素子間相互結合を表すインピーダンス行列の計算方法

2009年2月1日

平野拓一(東京工業大学)

1. はじめに

電磁界シミュレータの解析結果から素子相互結合を表す等価回路パラメータ、すなわちイ ンピーダンス行列、アドミタンス行列などを計算する方法について説明する。

2. モーメント法解析の結果を用いたインピーダンス行列の計算方法



例として図 1 に、2つのダイポールアンテナのモーメント法解析モデルを示す。モーメント法ではデルタギャップ給電を用いるとする。目的はこのダイポールアンテナ系の給電部のZ行列(あるいはY行列)を求めることである。

$$\begin{bmatrix} V_{1} \\ V_{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1} \\ I_{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{1} \\ I_{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1} \\ V_{2} \end{bmatrix}$$
(1)
(2)

ただし、 $Y = Z^{-1}$ の関係がある。 I_1, I_2 はそれぞれ V_1, V_2 を与えた集中定数的ポートにおける 電流値である。ここで、「集中定数的」というのは、ポートの大きさは波長に比して小さく なければならないという意味である。そうでなければ場所によって電圧および電流が変わ ってしまい、図 3 に示すような集中定数で用いる電圧 $\int_{\Gamma_\ell} \mathbf{E}_t \cdot d\mathbf{l}_\ell = V$ および電流



図 3 集中定数ポートの説明

式(1)、式(2)の Z 行列(Y 行列)の計算のために、図 2 に示すように各素子を順番に励振した 2 つのモデルを考える。励振されない素子は給電部を短絡した導体棒と見なすことができ る。モーメント法のデルタギャップ給電は、給電部に強制的に電界を印加するので、定電 圧源による励振と考えることができる。従って、式(2)のアドミタンス行列による考察が簡 単になる。式(2)を展開すると次式が得られる。

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \\ I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \end{cases}$$
(3)

従って、各Y行列の要素は次のように計算できる。

$$\begin{cases} Y_{11} = \frac{I_1}{V_1} \Big|_{V_2=0} \\ Y_{12} = \frac{I_1}{V_2} \Big|_{V_1=0} \\ Y_{21} = \frac{I_2}{V_1} \Big|_{V_2=0} \\ Y_{22} = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{V_1=0} \end{cases}$$

(4)

 $Y_{11} \ge Y_{21}$ は図 2(a)のモデルで、 $Y_{12} \ge Y_{22}$ は図 2(b)のモデルで計算できる。

3. 計算例

3.1 2素子ダイポールアンテナのインピーダンス行列の計算

図 1 において、 $l_1 = l_2 = \lambda/2$, $a_1 = a_2 = \lambda/1000$, $d = \lambda/2$ としてモーメント法[1] (平野 自作の *Mathematica* プログラム) で計算した。

$$Z_{in} = 84.3 + j34.4$$

そのとき、図 2(a)のダイポール 2 の短絡ポート電流は

 $I_2 = 0.00419 + j \ 0.000837$

であった。従って、

$$Y_{11} = Y_{22} = 0.0102 - j0.00415$$

$$Y_{12} = Y_{21} = 0.00419 + j0.000837$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0.0102 - j0.00415 & 0.00419 + j0.000837 \\ 0.00419 + j0.000837 & 0.0102 - j0.00415 \end{bmatrix}$$

$$Z = Y^{-1} = \begin{bmatrix} 82.4 + j48.8 & -16.3 - j33.5 \\ -16.3 - j33.5 & 82.4 + j48.8 \end{bmatrix}$$

式(1)より、素子2のポートを開放したときは $I_2 = 0$ なので、

 $V_1 = (82.4 + j48.8)I_1 \Rightarrow Z_{in} = V_1 / I_1 = 82.4 + j48.8$ (下の参考より、素子1のみがある 状況に近い)

式(2)より、素子 2 のポートを短絡したときは $V_2 = 0$ なので $I_1 = (0.0102 + j0.00415)V_1 \Rightarrow Z_{in} = V_1 / I_1 = 84.1 + j34.4$

【参考】

素子1のみがあるときの素子1の入力インピーダンスは $Z_{in} = 82.2 + j47.8$

【参考】Ansoft HFSS での計算結果は次のようになる。

		\rightarrow	\frown	>>>>	\times	\langle
	\bigotimes	\square			\square	
				\searrow	\sim	
\times	\otimes	\searrow			\leq	
	\ge	\sim				
				\square		
		-	\sim	\otimes		
				\searrow		
	/			\succ		
	K			>>>	$\langle \langle \langle \rangle$	
			$\sim \sim \sim \sim \sim$		~~	$\langle \langle \rangle$
				\sim	$\times \times \times$	X
Solution Da	ta: two_dipo	les - HFSSMode				
Solution Da Design Variation:	ta: two_dipo [0.061' py='	les - HFSSMode 1.22mm' xx='0.0915' y	211 ///////////////////////////////////			
Solution Da Design Variation: Simulation: Convergence Pri	ta: two_dipo ['0.061' py=' [Setup1 rofile Matrix I	<mark>les – HFSSMode</mark> 1.22mm' xx='0.0915' y ▼ Last/ Data	211 /y='0.0915' zz='0.122' Adaptive			
M Solution Da Design Variation: Simulation: Convergence Pr S Matrix ✓ Y Matrix ✓ Z Matrix	ta: two_dipo '0.061' py=' Setup1 rofile Matrix I Gamma Z0	Ies - HFSSMode 1.22mm' xx='0.0915' y Last/ Data Real/Imaginary All Freqs.	II //y='0.0915' zz='0.122' Adaptive Image: Comparison of the system o	Export	Equivalent Circui	Export
Solution Da Design Variation: Simulation: Convergence Pr S Matrix V Matrix V Matrix Z Matrix Freq	ta: two_dipo ['0.061' py=' Setup1 rofile Matrix I Gamma 20	Ies - HFSSMode 1.22mm' xx='0.0915' y Last/ Data Real/Imaginary All Freqs. Y:LumpPort1:1	.11 /y='0.0915' zz='0.122' Adaptive	Export	Equivalent Circuit	Export
Image: Solution Date Design Variation: Simulation: Convergence Prime S Matrix Image: Variation: S Matrix Image: Variation: S Matrix Image: Variation: Image: Variation: S Matrix Image: Variation: Image: Variation:	ta: two_dipo [0.061' py= Setup1 rofile Matrix I Gamma ZO umpPort1:1 (0. umpPort2:1 (0.	Ies - HFSSMode 1.22mm' xx='0.0915' y ↓ Last/ Data Real/Imaginary ↓ All Freqs. Y:LumpPort1:1 0095731, -0.0050423 0040403, 0.00022624	II vy='0.0915' zz='0.122' Adaptive I <td>Export 2:LumpPort1:1 (79.887, 56.744) (-14.495, -33.938)</td> <td>Equivalent Circuit Z:LumpPort2:1 (-14.495, -33.938) (79.938, 57.846)</td> <td>Export</td>	Export 2:LumpPort1:1 (79.887, 56.744) (-14.495, -33.938)	Equivalent Circuit Z:LumpPort2:1 (-14.495, -33.938) (79.938, 57.846)	Export

3.2 2素子ダイポールアンテナのインピーダンス行列の計算(NEC2 を用いた例) 図 1 において、 $l_1 = l_2 = \lambda/2$, $a_1 = a_2 = \lambda/1000$, $d = \lambda/2$ として NEC2[3]で計算した。

3.2.1 NEC2 によるインピーダンス行列の解析

【NEC2の入力ファイル】

	_
CM DIPOLE ANTENNA	
CE	
GW 1 13 0 0 -0.0306 0 0 0.0306 .000122	
GW 2 13 0.0612 0 -0.0306 0.0612 0 0.0306 .000122	
GE	
FR 0 1 0 0 2450. 100.	
EX 0 1 7 1 1.0 0.0	
XQ	
RP	
EN	

【出力ファイル】

1							
	********	*****	*****	*****			
	NUMEF	RICAL ELEC'	FROMAGNE	TICS CODI	E (NEC-2D)		
	********	******	******	******			
	C	OMMENTS -					
	0						
DIPO	OLE ANTENN	A					
	STRUC	TURE SPEC	IFICATION				
	COORI METEI	DINATES MU RS OR BE SC	JST BE INPU CALED TO M	UT IN IETERS			
	BEFOR	RE STRUCTU	JRE INPUT	IS ENDED			
WIRE					N	O. OF	FIRST
LAST TAG NO. X1 Y1	$\mathbf{Z1}$	X2	Y2	Z2	RADIUS	SEG.	SEG.
SEG. NO. 1 0.00000 0.00000	-0.03060	0.00000	0.00000	0.03060	0.00012	13	1
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	-0.03060	0.06120	0.00000	0.03060	0.00012	13	14
TOTAL SEGMENTS USED= 26 NO SEG IN A SYMMETRIC CELL= 26 SYMMETRY FLAG=							
0							
- MULTIPLE WIRE JUNCTIONS -							

	NONE	NONE									
COORDINATES IN METERS FAND 1 FINDLCATE THE SEGMENTS BEFORE AND AFTER I SEG ORIENTATION ANGLES WIRE NO X X X NO X X NO X X NO X <th colspan="</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>8</td> <td>EGMENT</td> <td>ATION DAT</td> <td>'A</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>				8	EGMENT	ATION DAT	'A				
IF AND 1-INDICATE THE SEGMENTS BEFORE AND AFTER I SEG. ORIENTATION ANGLES WIRE CONNECTION DATA TAG V Z LENGTH ALPHA BETA RADIUS I I I NO. X Y Z LENGTH ALPHA BETA RADIUS I 1 1 2 1 1 1 1 1 2 1 </td <td></td> <td></td> <td></td> <td>~</td> <td>COORDI</td> <td>NATES IN P</td> <td>METERS</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>				~	COORDI	NATES IN P	METERS				
SEG. COORDINATES OF SEG. CENTER SEG. ORIENTATION ANGLES WIRE CONNECTION DATA TAG NO. X Y Z LENGTH ALPHA BETA RADUS I			Τ±	AND I- IND	ICATE TH	E SECMEN	TS BEEO	DE AND AI	етер і		
SEG COORDINATES OF SEG ORIENTATION ANGLES WIRE NO. X Y Z LENGTH ALPHA BETA RADIUS I			1+.	AND I IND	IOALE III.	E SEGMEN	IS BEFO	ILL AND A	F I ER I		
CONNECTION FING X Y Z LENGTH ALPHA BETA RADIUS I I I NO. X Y Z LENGTH ALPHA BETA RADIUS I 2 1 1 0.00000 0.00000 0.00000 0.00012 1 2 1 3 0.00000 0.00000 0.00000 0.00012 2 3 4 1 4 0.00000 0.00000 0.00000 0.00012 3 4 5 1 5 0.00000 0.00000 0.00010 0.00012 4 5 6 1 7 0.00000 0.00000 0.00000 0.00012 7 8 9 1 10 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00012 1 1 1 1 11 0.00000 0.00000 0.00000 0.00001 0.00012 1 1 1 1 1 <td>SEG.</td> <td>COOR</td> <td>DINATES</td> <td>OF SEG.</td> <td>CENTER</td> <td>SEC</td> <td>Э.</td> <td>ORIENTA'</td> <td>TION ANGL</td> <td>es v</td> <td>WIRE</td>	SEG.	COOR	DINATES	OF SEG.	CENTER	SEC	Э.	ORIENTA'	TION ANGL	es v	WIRE
NO. 1 0.00000 0.00000 -0.02825 0.00471 90.00000 0.00012 0 1 2 1 2 3 0.00000 0.00000 -0.02854 0.00471 90.00000 0.00012 2 3 4 5 1 5 0.00000 0.00000 -0.00471 0.00471 90.00000 0.00001 2 4 5 6 6 7 1 7 0.00000 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 4 5 6 6 7 1 9 0.00000 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 6 7 8 9 1 9 0.00000 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 8 9 10 11 11 0.00000 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 8 9 10 11 11 0.00000 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 8 9 10 11 12 0.00000 0.00000 0.01883 0.0471 90.00000 0.00000 0.00012 8 9 10 11 11 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 11 2 13 13 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 10 11 12 13 14 0.06120 0.00000 -0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 10 11 15 2 15 0.06120 0.00000 -0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 11 5 6 2 16 0.06120 0.00000 -0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 11 5 6 2 16 0.06120 0.00000 -0.0471 90.00000 0.00000 0.00012 10 14 5 2 18 0.06120 0.00000 -0.0471 90.00000 0.00000 0.00012 11 18 19 2 20 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 18 19 2 21 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 18 19 2 22 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 18 19 20 1 2 23 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 12 12 2 23 2 24 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 12 22 3 24 25 24 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 22 23 24 25 24 0.06120 0.00000 0.01483 0.0471 90.00000 0.00000 0.00012 12 22 23 24 25 24 0.06120 0.00000 0.01883 0.0471 90.00000 0.00000 0.00012 12 3 24 25 2 24 0.06120 0.00000 0.01883 0.0471 90.00000 0.00000 0.00012 12 3 24 25 2 25 0.06120 0.000000 0.01883 0.0471 90.00000 0.00000 0.00012 23 24 25 2 24 0.06120 0.000000 0.02825 0.0471 90.00000 0.000000 0.00012 23 24 25 2 25 0.06120 0.000000 0.02825 0.0471 90.00000 0.000000 0.00012 24 25 26 0 2 ****** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0 0.000000 0.00012 25 26 0 2 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0 0.000000 0.000012 25 26	NO.	X	Y	Z	LENG	GTH A	LPHA	BETA	RADIUS	I- I	I+
<pre>***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 00000 0.0000 0.00012 1 2 3 4 1 1 0.00000 0.00000 0.00000 0.00012 1 3 4 5 1 1 0.00000 0.00000 0.00000 0.00012 1 0 3 4 5 1 1 0 0.00000 0.00000 0.00011 0.00000 0.00000 0.00012 1 5 6 7 1 1 0 0.00000 0.00000 0.00011 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 5 6 7 8 1 1 0 0.00000 0.00000 0.00471 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 7 8 9 10 1 0 0.00000 0.00000 0.00471 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 8 9 10 1 1 0 0.00000 0.00000 0.00471 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 8 9 10 1 1 1 0.00000 0.00000 0.01422 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 8 9 10 1 1 1 0.00000 0.00000 0.01483 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 10 12 13 1 1 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 12 3 1 1 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 12 3 1 1 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 13 12 1 1 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 18 19 2 1 5 0.06120 0.00000 0.01883 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 14 15 16 17 2 1 6 0.06120 0.00000 0.01883 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 14 15 16 17 2 1 7 0.06120 0.00000 0.00412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 18 19 20 21 2 2 2 0 0.06120 0.00000 0.00412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 18 19 2 2 2 2 0 0.06120 0.00000 0.00412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 12 22 2 2 2 0.06120 0.00000 0.000412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 12 22 2 2 2 0.06120 0.00000 0.000412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 12 22 2 2 2 0.06120 0.00000 0.000412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 12 22 2 2 2 0.06120 0.00000 0.00001 0.00000 0.00000 0.00012 12 22 2 2 2 2 0.06120 0.00000 0.000412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 22 2 2 2 2 0.06120 0.00000 0.00042 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 22 2 2 2 0.06120 0.00000 0.00042 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 22 2 2 2 0.06120 0.00000 0.00042 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 22 2 2 2 0.06120 0.00000 0.00042 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 22 2 2 2 0.06120 0.00000 0.00285 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 23 24 25 2 2 2 0.06120 0.000000 0.00285 0.00471 90.00000 0.00000</pre>	NO. 1	0.00000	0.00000	-0.02825	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	0 1	2 1	L
****** DATA CARDON 0.00000 0.000012 2 3 4 1 4 0.00000 0.00000 0.00171 90.00000 0.000012 3 4 5 6 1 5 0.00000 0.00000 0.00001 0.00010 0.00000 0.000012 5 6 7 8 1 7 0.00000 0.00000 0.00011 90.00000 0.000012 8 9 10 1 1 0.00000 0.00000 0.00112 0.00112 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12 13 11 11 11 12 13 11 12 13 11 11 11 11 11 11 11 11 12 13 11 11 12 13 11 13 11 13 11 13 14 15 15 16 17 18 16 16 17 18 16 16 <t< td=""><td>2</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td><td>-0.02354</td><td>0.00471</td><td>90.00000</td><td>0.00000</td><td>0.00012</td><td>1 2</td><td>3 1</td><td>L</td></t<>	2	0.00000	0.00000	-0.02354	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	1 2	3 1	L
****** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0.00000 0.00000 0.00012 13 4 5 6 1 6 0.00000 0.00000 0.00471 0.00471 90.00000 0.000012 4 5 6 7 1 7 0.00000 0.00000 0.00471 90.00000 0.00001 0.00012 7 8 9 1 9 0.00000 0.00000 0.00471 90.00000 0.00001 0.00012 7 8 9 10 1 10 0.00000 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 9 10 11 1 11 0.00000 0.00000 0.01432 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 19 10 11 1 11 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 10 11 12 13 1 13 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 11 2 13 1 14 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 11 11 2 13 0 14 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 14 15 16 2 15 0.06120 0.00000 0.02845 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 14 15 16 2 16 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 16 17 18 2 18 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.000012 16 17 18 2 18 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.000012 19 20 2 20 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.000012 19 20 21 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 19 20 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 19 20 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 0.00471 90.00000 0.00001 0.00012 19 20 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 0.00471 90.00000 0.00001 0.00012 19 20 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 0.00471 90.00000 0.00001 0.00012 19 20 2 23 0.06120 0.00000 0.00842 0.00471 90.00000 0.00001 0.00012 19 20 2 24 0.06120 0.00000 0.00842 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 12 22 33 4 25 25 0.06120 0.00000 0.01883 0.00471 90.00000 0.00001 0.00012 12 22 23 4 25 25 0.06120 0.00000 0.02855 0.00471 90.00000 0.00001 0.00012 24 25 26 0 2 5 0.06120 0.000000 0.02855 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 24 25 26 0 2 5 0.06120 0.000000 0.02855 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 24 25 26 0 2 5 0.06120 0.000000 0.02855 0.00471 90.00000 0.00000 0.000012 24 25 26 0 2 5 0.06120 0.000000 0.02855 0.00471 90.00000 0.000000 0.000012 24 25 26 0 2 5 0.06120 0.000000 0.02855 0.00471 90.00000 0.0000012 24 25 26 0 2 5 0.06120 0.000000 0	3	0.00000	0.00000	-0.01883	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	2 3	4 1	l
****** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0.00000 0.00000 0.000012 5 6 7 1 ***** DATA CARD NO. 1.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.000012 7 8 9 10 10 0.00000 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 7 8 9 10 1 11 0.00000 0.00000 0.00121 0 11 12 1 <td< td=""><td>4</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td><td>-0.01412</td><td>0.00471</td><td>90.00000</td><td>0.00000</td><td>0.00012</td><td>3 4</td><td>5</td><td>L</td></td<>	4	0.00000	0.00000	-0.01412	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	3 4	5	L
****** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.4500000 0.00000000000000000000000000000000000	5 6	0.00000	0.00000	-0.00942	0.00471 0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	4 D 5 G	7 1	L 1
****** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0.0471 0.00000 0.00000 0.00002 1.000002 1.000002 1.000002 1.000002 1.000002 1.1 1.1 10 0.00000 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00012 8 9 1.0 1.1 11 0.00000 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00012 10 11 12 12 0.00000 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00012 14 15 2 15 0.06120 0.00000 -0.02825 0.00471 90.00000 0.00012 14 15 2 16 0.06120 0.00000 -0.02844 0.00471 90.00000 0.00012 16 17 18 2 17 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00012 18 19 20 2 2 2 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00012 18 19 20 2 2 2 2 2 0.06120 0.00000	7	0.00000	0.00000	0.00000	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012		8	1
9 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.0012 8 9 10 1 10 0.00000 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00001 11 12 11 0.00000 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 10 11 12 13 1 13 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 0 14 15 2 14 0.06120 0.00000 -0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 0 14 15 2 15 0.06120 0.00000 -0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 16 17 18 16 17 18 16 17 18 19 20 2 2 2 0.06120 0.0000 -0.00471 90.0000 0.00012 19 20 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	8	0.00000	0.00000	0.00471	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	$\overline{7}$ 8	9	1
10 0.00000 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.000012 10 11 1 11 0.00000 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 10 11 12 13 1 13 0.00000 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 10 11 12 13 0 1 14 0.06120 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 14 15 16 17 2 15 0.6120 0.00000 -0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 16 17 18 2 16 0.06120 0.00000 -0.01412 0.00471 90.00000 0.00012 18 19 20 2 19 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00001 200 12 22 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 <td< td=""><td>9</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td><td>0.00942</td><td>0.00471</td><td>90.00000</td><td>0.00000</td><td>0.00012</td><td>8 9</td><td>10</td><td>1</td></td<>	9	0.00000	0.00000	0.00942	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	8 9	10	1
<pre>***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 2.45000E+03 1.00000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E 0.02825 0.00471 90.0000 0.0000E+03 1.0000E+02 0.00000E+00 0.00000 0.02825 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 11 12 13 0 11 14 0.06120 0.0000 -0.02825 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 10 14 15 16 2 16 0.06120 0.0000 -0.01833 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 15 16 17 2 17 0.06120 0.0000 -0.01412 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 16 17 18 19 2 2 19 0.06120 0.0000 -0.00471 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 18 19 20 2 20 0.06120 0.0000 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 18 19 20 2 21 0.06120 0.0000 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 18 19 20 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 18 19 20 2 23 0.06120 0.00000 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 12 22 23 2 24 0.06120 0.00000 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 21 22 23 2 23 0.06120 0.00000 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 21 22 23 2 24 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 21 22 23 2 24 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 22 24 25 2 25 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 21 22 23 24 24 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 22 24 25 2 26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00001 220 21 22 23 24 25 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00001 225 26 0 2 26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00001 225 26 0 2 26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00001 225 26 0 2 26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00001 225 26 0 2 26 0.06120 0.00000 E+00 0.00000E+00 0.00000E+</pre>	10	0.00000	0.00000	0.01412	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	9 10	11	1
11 2 0.00000 0.00234 0.00471 90.00000 0.00012 11 12 13 1 13 0.00000 0.00225 0.00471 90.00000 0.00012 14 15 2 15 0.06120 0.00000 -0.02354 0.00471 90.00000 0.00000 0.0012 14 15 2 16 0.06120 0.00000 -0.0183 0.00471 90.00000 0.00000 0.0012 16 17 18 19 2 19 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 18 19 20 2 20 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 21 22 2 <t< td=""><td>11</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td><td>0.01883</td><td>0.00471</td><td>90.00000</td><td>0.00000</td><td>0.00012</td><td>10 11</td><td>12</td><td>1</td></t<>	11	0.00000	0.00000	0.01883	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	10 11	12	1
14 0.00000 0.00225 0.00471 90.00000 0.000012 12 13 0 1 14 0.06120 0.00000 -0.02354 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 14 15 2 15 0.06120 0.00000 -0.0183 0.00471 90.00000 0.00000 0.0012 16 17 2 17 0.06120 0.00000 -0.0183 0.00471 90.00000 0.00000 0.0012 16 17 18 2 19 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00000 0.0012 18 19 2 20 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00012 21 22 2 21 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 21 22 2 </td <td>12</td> <td>0.00000</td> <td>0.00000</td> <td>0.02354</td> <td>0.00471</td> <td>90.00000</td> <td>0.00000</td> <td>0.00012</td> <td>11 12</td> <td>13</td> <td>1</td>	12	0.00000	0.00000	0.02354	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	11 12	13	1
****** DATA CARD	13	0.00000	0.00000	0.02825	0.00471 0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	12 13 0 14	15	1 9
16 0.06120 0.00000 -0.01883 0.00471 90.00000 0.000012 15 16 17 2 17 0.06120 0.00000 -0.01412 0.00471 90.00000 0.00012 16 17 18 19 18 0.06120 0.00000 -0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 18 19 20 2 20 0.06120 0.00000 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 18 19 20 2 21 0.06120 0.00000 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 20 21 22 2 <t< td=""><td>15</td><td>0.00120 0.06120</td><td>0.00000</td><td>-0.02354</td><td>0.00471 0.00471</td><td>90.00000</td><td>0.00000</td><td>0.00012</td><td>14 15</td><td>16</td><td>2</td></t<>	15	0.00120 0.06120	0.00000	-0.02354	0.00471 0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	14 15	16	2
17 0.06120 0.00000 -0.01412 0.00471 90.00000 0.000012 16 17 18 19 18 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.000012 18 19 22 20 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00012 18 19 20 21 2 21 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00012 20 21 2 2 21 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 20 21 2<	16	0.06120	0.00000	-0.01883	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	15 16	17	2
18 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 17 18 19 2 20 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 18 19 20 2 21 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 20 21 22 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 20 21 22 2 23 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 21 22 23 24 2 24 0.06120 0.00000 0.01471 90.00000 0.00000 0.00012 21 22 23 24 2 25 0.06120 0.00000 0.01471 90.00000 0.00000 0.00012 24 25 26 2 26 0.06120 0.00000 0.02354 0.0471 90.0000 0.000012 25 26 0 2 26 0.06120 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00	17	0.06120	0.00000	-0.01412	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	16 17	18	2
19 0.06120 0.00000 -0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 18 19 20 2 21 0.06120 0.00000 0.00001 0.00012 18 19 20 21 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.000012 21 22 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 21 22 2 23 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00012 21 22 23 24 2 24 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00012 23 24 25 2 25 0.66120 0.00000 0.02354 0.00471 90.0000 0.000012 24 25 26 2 26 0.06120 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.000000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 <td>18</td> <td>0.06120</td> <td>0.00000</td> <td>-0.00942</td> <td>0.00471</td> <td>90.00000</td> <td>0.00000</td> <td>0.00012</td> <td>17 18</td> <td>19</td> <td>2</td>	18	0.06120	0.00000	-0.00942	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	17 18	19	2
20 0.06120 0.00000 0.00471 0.00000 0.00000 0.00012 21 22 2 22 0.06120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 21 22 2 23 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 21 22 23 2 23 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 21 22 23 2 24 0.06120 0.00000 0.01413 90.00000 0.00000 0.00012 23 24 25 2 25 0.06120 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00012 24 25 26 2 26 0.06120 0.000000 0.02355 0.00471 90.00000 0.000012 24 25 26 0 2 ***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.45000E+03 1.00000E+00 0.00000E+00	19	0.06120	0.00000	-0.00471	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	18 19	20	2
21 0.00120 0.00000 0.00471 90.00000 0.00012 20 1 22 2 23 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00012 22 23 24 2 24 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.000012 23 24 2 25 0.06120 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 23 24 25 26 26 0.06120 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 24 25 26 2 26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.000012 25 26 0 2 26 0.6120 0.00000E+00 0	20	0.06120	0.00000	0.00000	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	19 20	21	2
22 0.06120 0.00000 0.01412 0.00471 90.00000 0.00001 22 22 22 24 2 24 0.06120 0.00000 0.01483 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 22 23 24 25 2 25 0.06120 0.00000 0.02354 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 24 25 26 2 26 0.06120 0.00000 0.02354 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 24 25 26 2 26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.0000 0.000012 25 26 0 2 26 0.06120 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1 7 1 1.00000E+02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 <td>21</td> <td>0.06120 0.06120</td> <td>0.00000</td> <td>0.00471 0.00942</td> <td>0.00471 0.00471</td> <td>90.00000</td> <td>0.00000</td> <td>0.00012</td> <td>$20 \ 21 \ 21 \ 22$</td> <td>22 23</td> <td>2</td>	21	0.06120 0.06120	0.00000	0.00471 0.00942	0.00471 0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	$20 \ 21 \ 21 \ 22$	22 23	2
24 0.06120 0.00000 0.01883 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 23 24 25 2 25 0.06120 0.00000 0.02354 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 24 25 26 2 26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.0000 0.00000 0.00012 24 25 26 0 2 ***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.45000E+03 1.00000E+02 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 2 EX 0 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0	23	0.06120	0.00000	0.00342 0.01412	0.00471 0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	21 22 23	23 24	2
25 0.06120 0.00000 0.02354 0.00471 90.00000 0.00000 0.0012 24 25 26 2 26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00000 0.00012 25 26 0 2 ***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.45000E+03 1.00000E+02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 2 EX 0 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 <t< td=""><td>24</td><td>0.06120</td><td>0.00000</td><td>0.01883</td><td>0.00471</td><td>90.00000</td><td>0.00000</td><td>0.00012</td><td>23 24</td><td>25</td><td>2</td></t<>	24	0.06120	0.00000	0.01883	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	23 24	25	2
26 0.06120 0.00000 0.02825 0.00471 90.00000 0.00002 0.0012 25 26 0 2 ***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.45000E+03 1.00000E+02 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 2 EX 0 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.000	25	0.06120	0.00000	0.02354	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	24 25	26	2
***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.45000E+03 1.00000E+02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 2 EX 0 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** FREQUENCY=2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS	26	0.06120	0.00000	0.02825	0.00471	90.00000	0.00000	0.00012	25 26	0	2
***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.45000E+03 1.00000E+02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 2 EX 0 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** FREQUENCY=2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS											
***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.45000E+03 1.00000E+02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 FREQUENCY FREQUENCY= 2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000											
***** DATA CARD NO. 1 FR 0 1 0 0 2.45000E+03 1.00000E+02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 2 EX 0 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00											
***** DATA CARD NO. 2 EX 0 1 7 1 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** DATA CARD NO. 3 XQ 0 0 0 0 0 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 ***** FREQUENCY FREQUENCY= 2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS MARE THAN 1.000	1 ***** I	DATA CAR $E+00$ 0.00	D NO.	1 FR 0.00000E+0	0 1	0	0 2.45	000E+03	1.00000E+02	0.00000	E+00
0.00000E+00 0.0000E+00	***** I	DATA CAR	D NO.	2 EX	0 1	7	1 1.00	000E+00	0.00000E+00	0.00000	E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 FREQUENCY FREQUENCY= 2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000	0.000001 ***** I	£+00 0.00 DATA CAR	000E+00 2D NO. 3	0.00000E+0 3 XQ	0 0	0	0 0.00	000E+00	0.00000E+00	0.00000	E+00
FREQUENCY= 2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000	0.000001	E+00 0.00	000E+00	0.00000E+0	00						
FREQUENCY = 2.4500E+03 MHZ FREQUENCY = 2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH = 1.2237E-01 METERS APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000											
FREQUENCY= 2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000					EDEOLIE	NICI					
FREQUENCY= 2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000					- FREQUE	Y					
APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000	FREQUENCY= 2.4500E+03 MHZ WAVELENGTH= 1.2237E-01 METERS										
APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000											
APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000											
		APPROXIMATE INTEGRATION EMPLOYED FOR SEGMENTS MORE THAN 1.000									
WAVELENGTHS APAKT	WAVELI										

STRUCTURE IMPEDANCE LOADING										
				THIS	STRUCT	URE IS NOT	LOADED			
				A	NTENNA E	INVIRONME	NT			
					FREE	SPACE				
				MA'	FRIX TIMI	NG				
			FILL=	0.000	SEC., FA	CTOR= 0.	000 SEC.			
					,					
					ANT	'ENNA INPU	T PARAMET	ERS		
TAG	SI		VOLTACI	F (VOLT	3)	CURREN	T (AMPS)	IM	PFDAN	TF (OHMS)
ADMITT	FANCI	E (MHOS) P(DWER	5)	COMMEN	I (AMI 5)	11/1		
NO. IMAG.	NO. (W	. REA /ATTS)	L	IMAG.	REA	L IM	AG. I	(EAL	IMAG.	REAL
1 1.01465I	E-02-4	7 .06074E-0	$1.00000 \\ 03\ 5.0732$	E+00 0 7E-03	.00000E+00	1.01465E	02-4.06074E	-03 8.49497	E+01 3	.39977E+01
				CURRI	ENTS AND	LOCATION -				
				DIGTA	NCESINU	WAVELENCT	пс			
				DISTA	NCES IN V	VAVELENGI	по			
SEG.	TAG	COO	RD. OF S	EG. CEN'	TER S	EG.	CURI	RENT (AMPS)		
NO. 1	NO. 1	X 0.0000	Y 0.0000	Z -0.2308	LENG 0.03847	TH REA 1.5606E-03	L IM 8.7805E-04	AG. MA 1.7906E-03	AG. -29.364	PHASE
2	1	0.0000	0.0000	-0.1924	0.03847	4.0238E-03 -	2.1901E-03	4.5812E-03	-28.559	
3	1	0.0000	0.0000	-0.1539	0.03847	6.0983E-03 -	3.1948E-03	6.8844E-03	-27.649	
4 5	1	0.0000	0.0000	-0.1154 -0.0769	0.03847 0.03847	9.0859E-03 -	3.9094E-03 4 3005E-03	8.7312E-03 1.0052E-02	-26.599	
6	1	0.0000	0.0000	-0.0385	0.03847	9.8782E-03 -	4.3240E-03	1.0783E-02	-23.640	
7	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.03847	1.0147E-02	4.0607E-03	1.0929E-02	-21.812	
8	1	0.0000	0.0000	0.0385	0.03847	9.8782E-03	4.3240E-03	$1.0783 \text{E}{-}02$	-23.640	
9	1	0.0000	0.0000	0.0769	0.03847	9.0859E-03	-4.3005E-03	1.0052E-02	-25.329	
10	1	0.0000	0.0000	0.1154	0.03847 0.03847	7.8071E-03	-3.9094E-03	8.7312E-03 6.8844E-03	-26.599	
12	1	0.0000	0.0000	0.1935 0.1924	0.03847 0.03847	4 0238E-03	-2 1901E-03	4 5812E-03	-28 559	
13	1	0.0000	0.0000	0.2308	0.03847	1.5606E-03	-8.7805E-04	1.7906E-03	-29.364	
14	2	0.5001	0.0000	-0.2308	0.03847	6.3631E-04	9.5841E-05	6.4348E-04	8.566	
15	2	0.5001	0.0000	-0.1924	0.03847	1.6382E-03	$2.4562 \text{E}{-}04$	$1.6565 \text{E}{-}03$	8.527	
16	2	0.5001	0.0000	-0.1539	0.03847	2.4799 E- 03	3.7050E-04	$2.5074 \text{E}{-}03$	8.497	
17	2	0.5001	0.0000	-0.1154	0.03847	3.1720E-03	4.7269E-04	3.2070E-03	8.476	
18	2	0.5001	0.0000	-0.0769	0.03847	3.6893E-03	5.4882E-04	3.7299E-03	8.461	
19	2	0.5001	0.0000	-0.0385	0.03847	4.0094E-03	5.9585E-04	4.0535E-03	8.453	
20	2	0.5001	0.0000	0.0000	0.03847 0.03847	4.1179E 03	5 9585E-04	4.1051E-03	8 453	
22	$\frac{1}{2}$	0.5001	0.0000	0.0769	0.03847	3.6893E-03	5.4882E-04	3.7299E-03	8.461	
23	$\overline{2}$	0.5001	0.0000	0.1154	0.03847	3.1720E-03	4.7269E-04	3.2070E-03	8.476	
24	2	0.5001	0.0000	0.1539	0.03847	2.4799E-03	3.7050E-04	2.5074E-03	8.497	
25	2	0.5001	0.0000	0.1924	0.03847	1.6382E-03	2.4562 ± 04	1.6565 E-03	8.527	
26	2	0.5001	0.0000	0.2308	0.03847	6.3631E-04	9.5841E-05	6.4348E-04	8.566	
					POWF	R BUDGET -				
					1000	TIDOLOGI T				

3.2.2 ポート2にZ_Lを付加した場合のポート1の入力インピーダンス 【上のZ行列より】

 $\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \text{ and } V_2 = -Z_L I_2 \quad (負号は電流の向きの定義の違いによる)$

$$\begin{cases} V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 , \\ V_2 = -Z_LI_2 \end{cases}, \begin{cases} V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ -Z_LI_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{cases}, \begin{cases} V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ -Z_LI_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{cases}, \\ I_2 = -\frac{Z_{21}}{Z_L + Z_{22}}I_1 \end{cases}, V_1 = Z_{11}I_1 - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_L + Z_{22}}I_1 \end{cases}$$
$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_L + Z_{22}}$$
$$Z_L = -j50 \ \text{O} \ \text{Best{abs}}, \\ Z_{in} \cong 93.2 + j34.2 \end{cases}$$

【NEC2の入力ファイル (Port2 に集中定数素子Z = -j50を接続)】

CM DIPOLE ANTENNA
CE
GW 1 13 0 0 -0.0306 0 0 0.0306 .000122
$\mathrm{GW}\; 2\; 13\; 0.0612\; 0\; \textbf{-}0.0306\; 0.0612\; 0\; 0.0306\; .000122$
GE
LD 4 2 7 7 050.
FR 0 1 0 0 2450. 100.
EX 0 1 7 1 1.0 0.0
XQ
RP 0 1 1 0000 90. 0. 1. 1.
EN

上記ファイルを実行すると、

 $Z_{in} \cong 93.3 + j34.2$

と、アンテナ系等価回路モデル表現での計算と同様の結果が得られる。

3.2.3 ポートに集中定数素子を接続した場合の消費電力

CM DIPOLE ANTENNA CE GW 1 13 0 0 -0.0306 0 0 0.0306 .000122 GW 2 13 0.0612 0 -0.0306 0.0612 0 0.0306 .000122 GE LD 4 2 7 7 50. -50. FR 0 1 0 0 2450. 100. EX 0 1 7 1 1.0 0.0 XQ RP 0 1 1 0000 90. 0. 1. 1. EN

ポート2に $Z_L = 50 + j50$ を接続すると、NEC2の出力ファイルでは

	···· CURRENTS AND LOCATION · · ·									
DISTANCES IN WAVELENGTHS										
SEG. NO.	TAG NO.	COO X	RD. OF SI Y	EG. CENT Z	FER SI LENG	EG. TH REAI	CURR	ENT (AMPS) AG. MA	 .G.	PHASE
20	2	0.5001	0.0000	0.0000	0.03847	2.2379E-03	1.6879E-03	2.8030E-03	37.025	

 - POWER BUDGET
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$

が得られる。100%-95.79%=4.21%が Z_L で消費されている。 この値は電気回路学の消費電力 $\frac{\operatorname{Re}[Z|I|^2]}{2}$ の計算値と一致している。

参考文献

[1] モーメント法入門

http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/mom/mom2/index-j.html

- [2] J.L. Volakis et al., Finite Element Method for Electromagnetics, IEEE Press, p.160, NY, 1998.
- [3] http://www.nec2.org/

付録

A HFSS でのインピーダンス行列の計算方法

HFSS は電界ベースの有限要素法解析[2]を行うので、次のヘルムホルツの波動方程式を解いている。

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r}\right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = -jk_0 \eta_0 \mathbf{i}_e - \nabla \times \left(\frac{\mathbf{i}_m}{\mu_r}\right)$$
(A-1)

これからは筆者の予想も含まれるから、正確でないかもしれないが、解析は次の順に行われているはずである。

1)集中定数的ポートに表面インピーダンス $Z_s = Z_0 \frac{w}{\ell}$ (ユーザーが任意の値を指定)を 与える。これは集中定数的ポートの内部インピーダンスをシミュレートするためのも のである。

$$\mathbf{E}_{t} = Z_{s} \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{t}$$

HFSS では下記の並列 R,L,C の値を設定する。

$$Y_{0} = \frac{1}{Z_{0}} = \frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}$$

$$\begin{cases} \int_{\Gamma_{\ell}} \mathbf{E}_{t} \cdot d\mathbf{l}_{\ell} = V \\ \int_{\Gamma_{w}} (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{t}) \cdot (\underline{-\hat{\mathbf{n}}} \times d\mathbf{l}_{w}) = I \\ \Rightarrow \begin{cases} \iint_{S} \mathbf{E}_{t} \cdot \hat{\mathbf{l}}_{\ell} dS = V \int_{\Gamma_{w}} d\ell_{w} \\ \iint_{S} (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{t}) \cdot \hat{\mathbf{l}}_{\ell} dS = I \int_{\Gamma_{\ell}} d\ell_{\ell} \end{cases}$$

$$V = Z_{0}I$$



$$\frac{\iint_{S} \mathbf{E}_{t} \cdot \hat{\mathbf{l}}_{\ell} dS}{\int_{\Gamma_{w}} d\ell_{w}} = Z \frac{\iint_{S} (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{t}) \cdot \hat{\mathbf{l}}_{\ell} dS}{\int_{\Gamma_{\ell}} d\ell_{\ell}}$$
$$\mathbf{E}_{t} = Z_{0} \frac{\int_{\Gamma_{w}} d\ell_{w}}{\int_{\Gamma_{\ell}} d\ell_{\ell}} \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{t}$$

上式を $\mathbf{E}_{t} = \mathbf{Z}_{s} \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{t}$ と比較すると次の関係が得られる。

$$Z_s = Z_0 \frac{w}{\ell}$$

- 2) 励振電流源 \mathbf{i}_{e} (または磁流源 \mathbf{i}_{m})を与える。
- 3) 電磁界解析を実行する。

4) 電磁界解析結果の電界より、集中定数的ポートの電圧 $\int_{\Gamma_{\ell}} \mathbf{E}_{t} \cdot d\mathbf{l}_{\ell} = V$ が計算できる。

5)励振電流より、集中定数的ポートへの印加電流 $\int_{\Gamma_w} \mathbf{i}_e \cdot (\underline{-\hat{\mathbf{n}} \times d\mathbf{l}_w}) = I_0$ が計算できる。

【補足】
電磁界解析結果の磁界による電流値
$$\int_{\Gamma_w} (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_1) \cdot (-\hat{\mathbf{n}} \times d\mathbf{I}_w) = I は一般には I_0 とは= \hat{I}_ℓ
異なる。なぜならば、右図のように集中定数ポ
ートの外部インピーダンスの違いにより、集中
定数ポートの内部インピーダンスにも電流が
流れ、 $I_0 \ge Y_0$ に流れる電流の和が I になるか
らである。$$



6) 4の*V* および5の I_0 から、自己アドミタンス $Y_{11} = Y_0 + Y = \frac{I_0}{V}$ が計算できる。もちろ

ん複数ポートの場合も同様にして相互アドミンタンスも計算できる。つまり Y 行列の 計算ができる。Z 行列は Y 行列の逆行列で計算できる。

【補足(内部インピーダンス値を変更する)】 各ポートiで次式が成り立つ。

$$\begin{cases} V'_{i} = V_{i} + Z_{0i}I'_{i} \\ I'_{i} = I_{i} \end{cases}$$
$$\{V\} = [Z]\{I\} \\ \{V'\} - \operatorname{diag}[Z_{0i}]\{I'\} = [Z]\{I'\} \end{cases}$$



$$\{V'\} = \underbrace{\llbracket Z \end{bmatrix} + \operatorname{diag}[Z_{0i}]}_{=[Z']} \{I'\}$$

このように対角要素にそのポートの内部インピーダンスを加算するのみで各ポート の内部インピーダンスの変更は可能である。

7) S パラメータを計算したいときは、

$$S_{11} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

で反射係数を計算できる。集中定数的ポートには内部インピーダンスを指定しないと $(Z_0 = 0 \pm k \ge 2)$ 常に全反射になってしまうので、この意味で集中定数的ポートには内部インピーダンスを定義している。

一般のNポートでは、付録BのようにZ行列⇔S行列の変換が可能である。

BZ行列⇔S行列の変換

*V,Iと a,b*の間には次の関係がある。

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \operatorname{diag}(\sqrt{Z_i})(\mathbf{a} + \mathbf{b}) \\ \mathbf{I} = \operatorname{diag}(1/\sqrt{Z_i})(\mathbf{a} - \mathbf{b}) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{a} = \frac{\operatorname{diag}(1/\sqrt{Z_i})\mathbf{V} + \operatorname{diag}(\sqrt{Z_i})\mathbf{I}}{2} \\ \mathbf{b} = \frac{\operatorname{diag}(1/\sqrt{Z_i})\mathbf{V} - \operatorname{diag}(\sqrt{Z_i})\mathbf{I}}{2} \end{cases}$$
(B-1)

ここで、 $\operatorname{diag}(1/\sqrt{Z_i})\operatorname{diag}(\sqrt{Z_i}) = U$ (単位行列)である。

式(B-1)より、

$$\begin{cases} \mathbf{a} = \frac{D^{-1}\mathbf{V} + D\mathbf{I}}{2} \\ \mathbf{b} = \frac{D^{-1}\mathbf{V} - D\mathbf{I}}{2} \end{cases}$$

ここで、
$$D = \operatorname{diag}(\sqrt{Z_1}, \sqrt{Z_2}, \cdots, \sqrt{Z_n})$$

$$\frac{D^{-1}\mathbf{V} - D\mathbf{I}}{2} = S\left[\frac{D^{-1}\mathbf{V} + D\mathbf{I}}{2}\right]$$

$$D^{-1}\mathbf{V} - D\mathbf{I} = S\left(D^{-1}\mathbf{V} + D\mathbf{I}\right)$$

$$D^{-1}\mathbf{V} - D\mathbf{I} = SD^{-1}\mathbf{V} + SD\mathbf{I}$$

$$D^{-1}\mathbf{V} - SD^{-1}\mathbf{V} = D\mathbf{I} + SD\mathbf{I}$$

$$(U \ \cdot \mathbf{E} \ \mathbf{E} \ \cdot \cdot$$

$$(U-S)D^{-1}\mathbf{V} = (U+S)D\mathbf{I}$$

$$\mathbf{V} = ((U-S)D^{-1})^{-1}(U+S)D\mathbf{I}$$

$$\mathbf{V} = D(U-S)^{-1}(U+S)D\mathbf{I}$$

たので、
$$\mathbf{V} = Z\mathbf{I} \succeq 比較して$$

$$Z = D(U-S)^{-1}(U+S)D$$

$$= \operatorname{diag}(\sqrt{Z_1}, \sqrt{Z_2}, \cdots, \sqrt{Z_n})(U-S)^{-1}(U+S)\operatorname{diag}(\sqrt{Z_1}, \sqrt{Z_2}, \cdots, \sqrt{Z_n})$$

$$\Box \equiv \mathbb{C} \subset \mathbb{C}, \quad Z_1 = Z_2 = \cdots = Z_n = Z_0 \ \mathcal{O} \succeq \gtrless l \ddagger, \quad Z = (U-S)^{-1}(U+S)Z_0$$

$$C = C, \quad Z_1 = Z_2 = \dots = Z_n = Z_0 \quad 0 \geq \exists \{z, Z = (U-S) \mid (U+S) \}$$

$$Z = D(U - S)^{-1}(U + S)D を S について解くと、$$

$$(U - S)D^{-1}Z = (U + S)D$$

$$D^{-1}Z - SD^{-1}Z = D + SD$$

$$D^{-1}Z - D = SD^{-1}Z + SD$$

$$D^{-1}Z - D = S(D^{-1}Z + D)$$

$$S = (D^{-1}Z - D)(D^{-1}Z + D)^{-1}$$

$$= D^{-1}(Z - D^{2})(D^{-1}(Z + D^{2}))^{-1}$$

$$= D^{-1}(Z - D^{2})(Z + D^{2})^{-1}D$$

$$\Box \Box \heartsuit, \ Z_{1} = Z_{2} = \dots = Z_{n} = Z_{0} \oslash \flat \doteqdot it, \ S = (Z - Z_{0}U)(Z + Z_{0}U)^{-1}$$

 $Z \Rightarrow S$ $\overline{Z \rightarrow S}$ は、ポート*i*にインピーダンス Z_i を接続すると、 $\mathbf{V} = Z\mathbf{I}$ 式(B-1)より、

 $\begin{cases} \mathbf{V} = D(\mathbf{a} + \mathbf{b}) \\ \mathbf{I} = D^{-1}(\mathbf{a} - \mathbf{b}) \end{cases}$ $\Box \Box \mho, D = \operatorname{diag}(\sqrt{Z_1}, \sqrt{Z_2}, \dots, \sqrt{Z_n})$ $D(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = Z[D^{-1}(\mathbf{a} - \mathbf{b})]$ $D\mathbf{a} + D\mathbf{b} = ZD^{-1}\mathbf{a} - ZD^{-1}\mathbf{b}$ $ZD^{-1}\mathbf{b} + D\mathbf{b} = ZD^{-1}\mathbf{a} - D\mathbf{a}$

$$S = (ZD^{-1} + D)^{-1}(ZD^{-1} - D) & Z \ i \subset \ \forall \lor \forall \in S \\ (ZD^{-1} + D)S = (ZD^{-1} - D) \\ ZD^{-1}S + DS = ZD^{-1} - D \\ ZD^{-1}S - ZD^{-1} = -D - DS \\ ZD^{-1}(S - U) = -D(S + U) \\ Z = -D(S + U)(D^{-1}(S - U))^{-1} \\ = -D(S + U)(S - U)^{-1}D$$

ここで、 $Z_1 = Z_2 = \dots = Z_n = Z_0 \mathcal{O}$ ときは、 $Z = Z_0 (S+U)(U-S)^{-1}$