

# テーラー分布による導波管スロットアレイ

飯口 真一・久田 安正・井上 昭\*

## 1. ま え が き

アンテナに与える開口面分布の一つにテーラー分布 [1] があるが、ここでは、この分布によって導波管スロットアレイを設計・試作してみた。

また、(1) T. T. Taylor の論文にある電界パターン式の電算機による数値計算と、(2) 開口面分布  $f(P)$  を基とした不連続波源によるパターンの数値計算を行ない比較した。その結果、これらは実測によるパターンとかなりよく一致した。

## 2. 設 計

- (1) アンテナの形式
- ③ ブロードサイドアレイ                      共振型
  - ⑥ ビーム偏向アレイ                        進行波型
- (2) 素子間隔  $d$

$$d = \frac{\lambda \cdot \lambda_g}{2 \cdot (\lambda_g \sin \theta_0 + \lambda)} \quad (1)$$

ただし、スロットは図1の様に千鳥配列とする。 $\theta_0$  はアレイの法線方向から測ったビーム偏向角 (図2参照)。

- (3) 素子数  $n$
- T. T. Taylor [1] によれば、ビーム幅  $2 \cdot \theta_b$  は

$$2 \cdot \theta_b = \frac{\lambda \cdot \bar{n}}{2l \cos \theta_0 \sqrt{A^2 + \left(\bar{n} - \frac{1}{2}\right)^2}} \cdot \frac{2}{\pi} \sqrt{(\cos h^{-1} R)^2 - \left(\cos h^{-1} \frac{R}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (2)$$

- ここで、 $\theta_0$ : ビーム偏向角  
 $2\theta_b$ : ビーム幅  
 $2l$ : アレイの全長  
 $R$ : サイドロープレベル

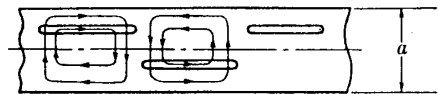


図 1

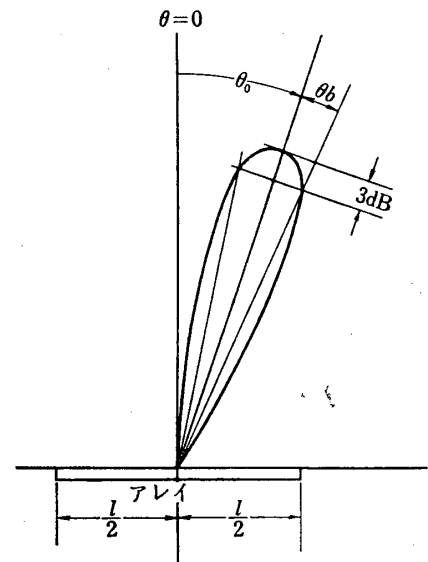


図 2

\* 日星製作所

表 1

サイドローレベル		$A^2$	$\sigma$						
$R$ (dB)	$R$		$\bar{n}=2$	$\bar{n}=3$	$\bar{n}=4$	$\bar{n}=5$	$\bar{n}=6$	$\bar{n}=7$	$\bar{n}=8$
0	1.00000	0.00000	1.33333	1.20000	1.14286	1.11111	1.09091	1.07692	1.06667
5	1.77828	0.14067	1.29351	1.18672	1.13635	1.10727	1.08838	1.07514	1.06534
10	3.16228	0.33504	1.24393	1.16908	1.12754	1.10203	1.08492	1.07268	1.06350
15	5.62341	0.58950	1.18689	1.14712	1.11631	1.09528	1.08043	1.06949	1.06112
20	10.0000	0.90777	1.12549	1.12133	1.10273	1.08701	1.07490	1.06554	1.05816
25	17.7828	1.29177	—	1.09241	1.08698	1.07728	1.06834	1.06083	1.05463
30	31.6228	1.74229	—	—	1.06934	1.06619	1.06079	1.05538	1.05052
35	56.2341	2.25976	—	—	—	1.05386	1.05231	1.04923	1.04587
40	100.0000	2.84428	—	—	—	—	1.04298	1.04241	1.04068

$A^2$ :  $\cos hA$  は  $R$  の逆数 (表1参照)

$\bar{n}$ : 一様なサイドローレベルの領域の境界を決定する整数で, サイドローレベルが 25 dB なら  $\bar{n} \geq 3$ , 40 dB なら  $\bar{n} \geq 6$  となる.

ところで

$$2l = d \cdot (n-1) \quad (3)$$

よって式 (2), (3) より素子数  $n$  は

$$n = \frac{\lambda}{\theta b \cdot \cos \theta_0 \cdot d} \cdot \frac{\bar{n}}{\sqrt{A^2 + \left(\bar{n} - \frac{1}{2}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\pi} \sqrt{(\cos h^{-1} R)^2 - \left(\cos h^{-1} \frac{R}{\sqrt{2}}\right)^2} + 1 \quad (4)$$

(4) スロットの正規化コンダクタンス  $g_k$

① ブロードサイドアレイ

$$g_k = \frac{f(p_k)^2}{N \sum_{s=1}^N f(p_s)^2}, \quad N = \frac{n}{2} - 1, \quad n: \text{偶数} \quad (5)$$

$$N = \frac{n-1}{2}, \quad n: \text{奇数}$$

ここで  $f(p_k)$  は  $k$  番目のスロットの位置  $p$  に対応するテーラーによる開口面分布で (付録, 式 (11), (12) 参照),

$$p_k = \frac{\pi z_k}{l}, \quad -l \leq z \leq l, \quad -\pi \leq p \leq \pi$$

② ビーム偏向アレイ

$$l \cdot g(p_k) = \frac{\pi \cdot f(p_k)^2}{\frac{1}{1-r} \int_{-\pi}^{\pi} f(p)^2 dp - \int_{-\pi}^{p_k} f(p)^2 dp} \quad (6)$$

ただし,  $r = \frac{\text{負荷損失}}{\text{入力}}$

$p$  と  $l \cdot g(p)$  の関係は式 (6) であるが [2],  $\bar{n}=5$  のときは図3で示されている. [2], [3]

(5) アレイの輻射界  $E$

① T. T. Taylor の輻射界式 [1], [4]

Taylor の論文より

$$E(u, A, \bar{n}) = C \frac{\sin \pi u}{\pi u} \prod_{m=1}^{m=\bar{n}-1} \left\{ \frac{1 - \frac{u^2}{\sigma^2 \left[ A^2 + \left( m - \frac{1}{2} \right)^2 \right]}}{1 - \frac{u^2}{m^2}} \right\} \quad (8)$$

ここで,  $u = \frac{2l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0)$

$A^2$ :  $\cos hA$  は  $R$  の逆数 (表1)

$\sigma^2$ : サイドローブレベルと  $\bar{n}$  で決まる定数 (表1 参照)

② 開口面分布  $f(p)$  を基とした不連続波源による輻射界式

$n$ : 偶数

$$E_{n_s} = 2 \cdot \sum_{k=0}^N f(p_k) \cdot \cos \frac{(2k+1)}{2} \psi_{\theta}, \quad N = \frac{n}{2} - 1 \quad (9)$$

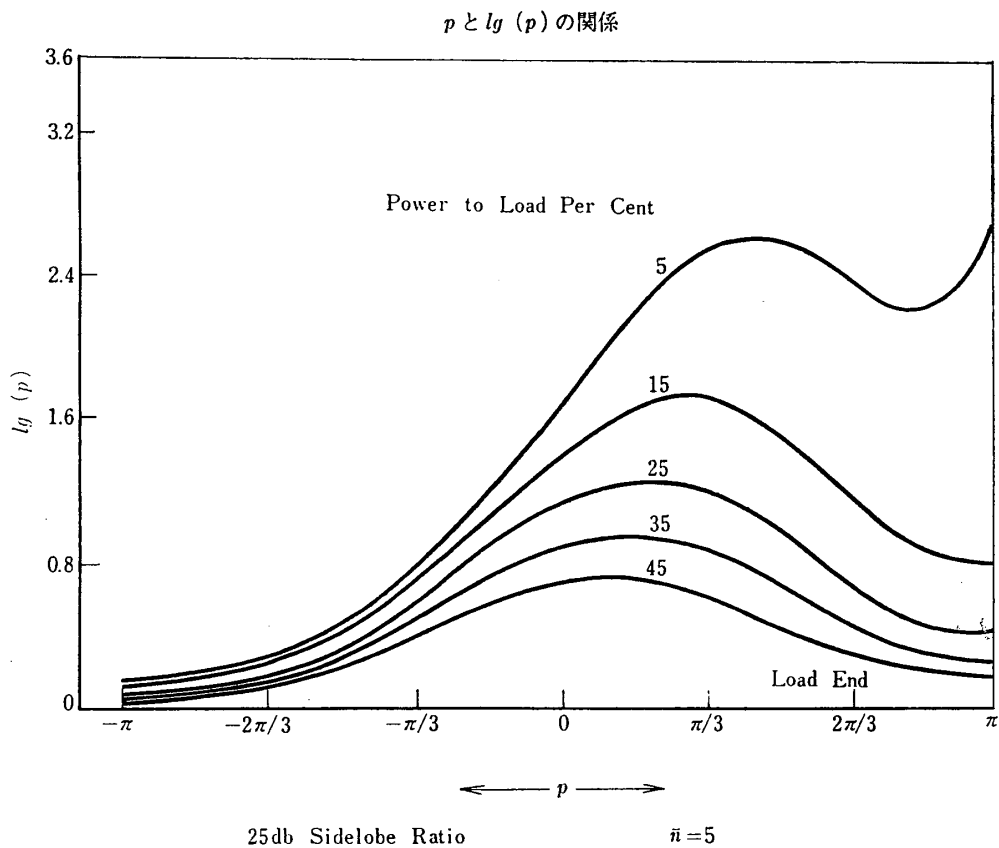


図 3 a

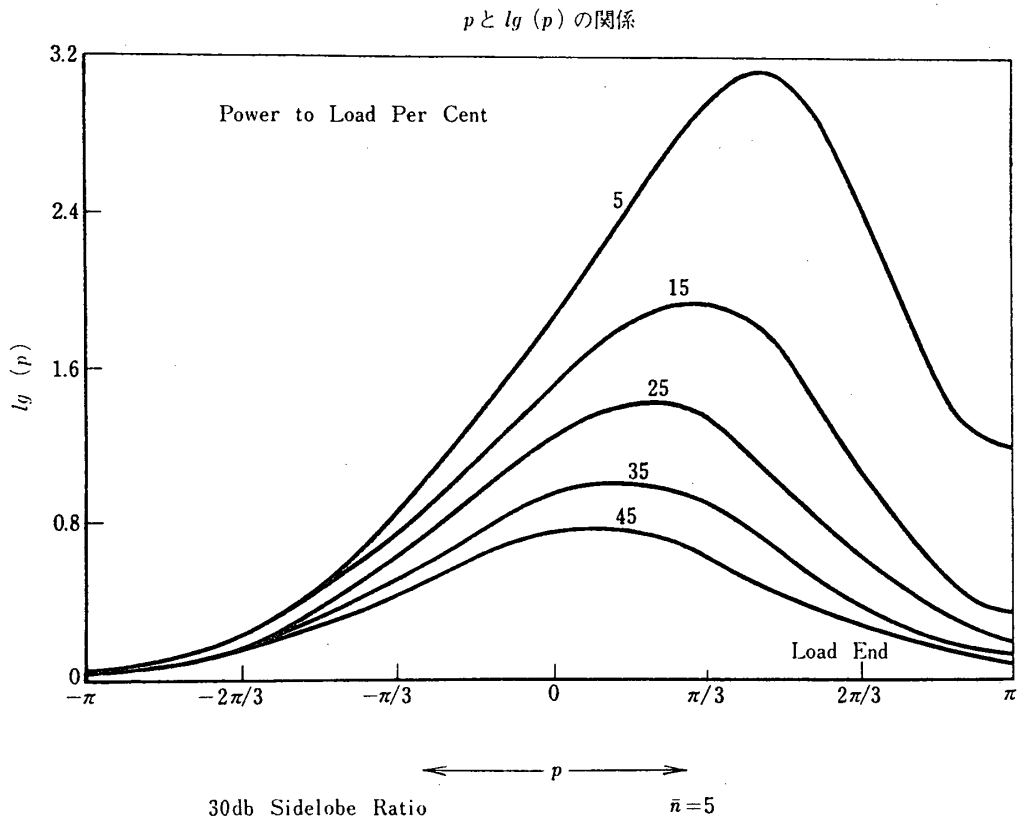


図 3 b

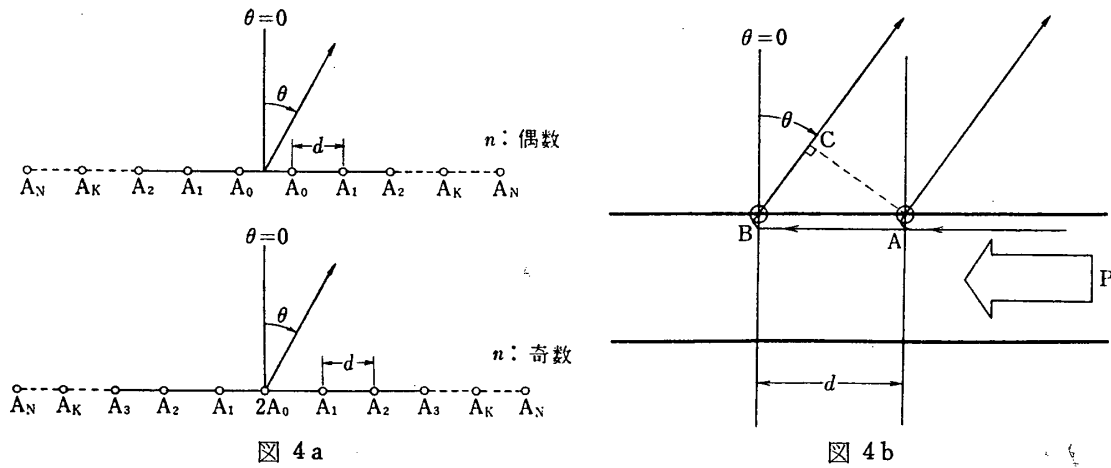


図 4 a

図 4 b

n: 奇数

$$E_{n_0} = 2 \cdot \sum_{k=0}^N f(p_k) \cdot \cos\left(2k \cdot \frac{1}{2}\right) \Psi_{\theta}, \quad N = \frac{n-1}{2} \quad (10)$$

ここに,  $\Psi_{\theta} = Kd \sin \theta + \beta d + \pi$

ただし,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$

## 3. 試作結果

アレイの各スロットは  $H$  面の共振シャントスロットとし (図5), スロット間の相互結合は考慮しなかった.

## (a) ブロードサイドアレイ (共振型)

周波数 9380 MHz, サイドローレベル -30 dB, ビーム幅 6 度としたとき, 素子数は式 (4) より 16 となった. このときの V. S. W. R 特性を図6に, 実測した輻射パターンを図7a, b, c, d に示した. 結果を総合して表2に示す.

なお, 理論的な輻射パターンは式 (8) によるものと, 式 (9) によるものをそれぞれ図8a, b に示し, また式 (9) のパターンにスロット自体のパターン (図9a, b) を考慮して

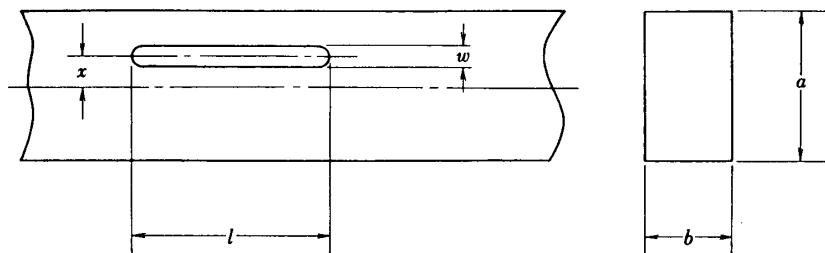


図5

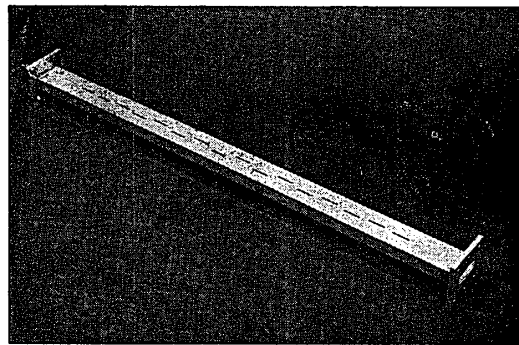


写真 a ブロードサイドアレイ

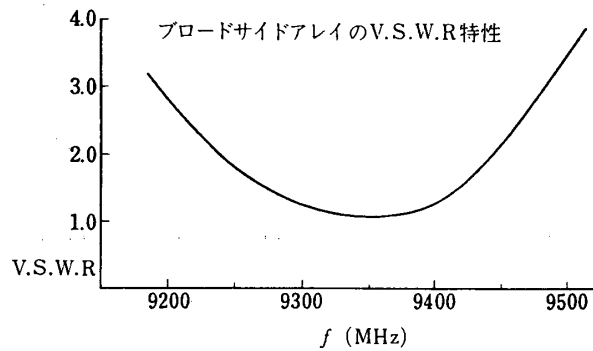


図6

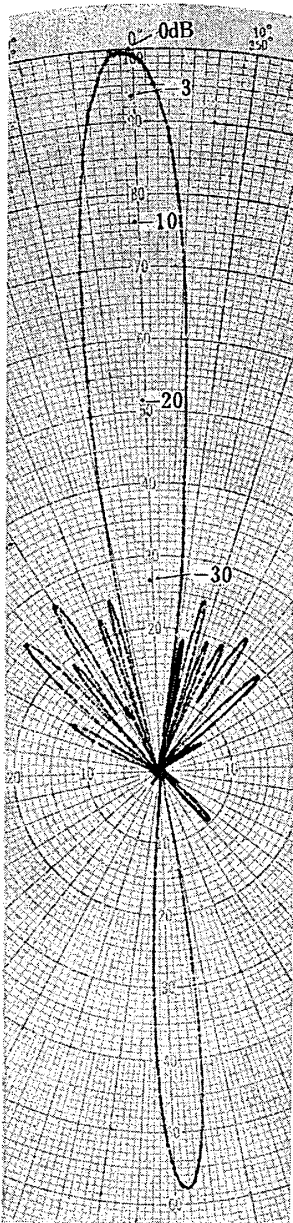


図 7 a  $f = 9250$  MHz,  $H$  面  
実測値

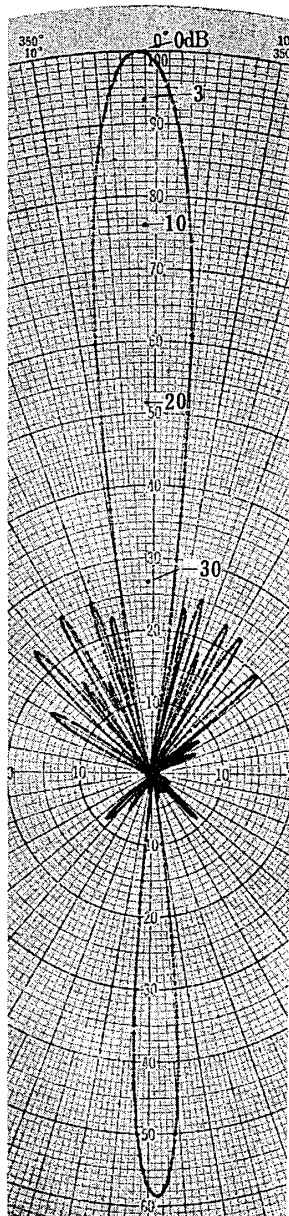


図 7 b  $f = 9380$  MHz,  $H$  面  
実測値

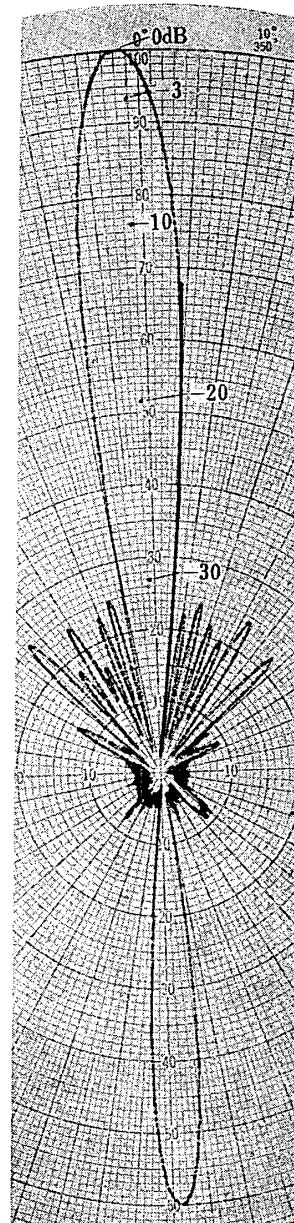


図 7 c  $f = 9440$  MHz,  $H$  面  
実測値

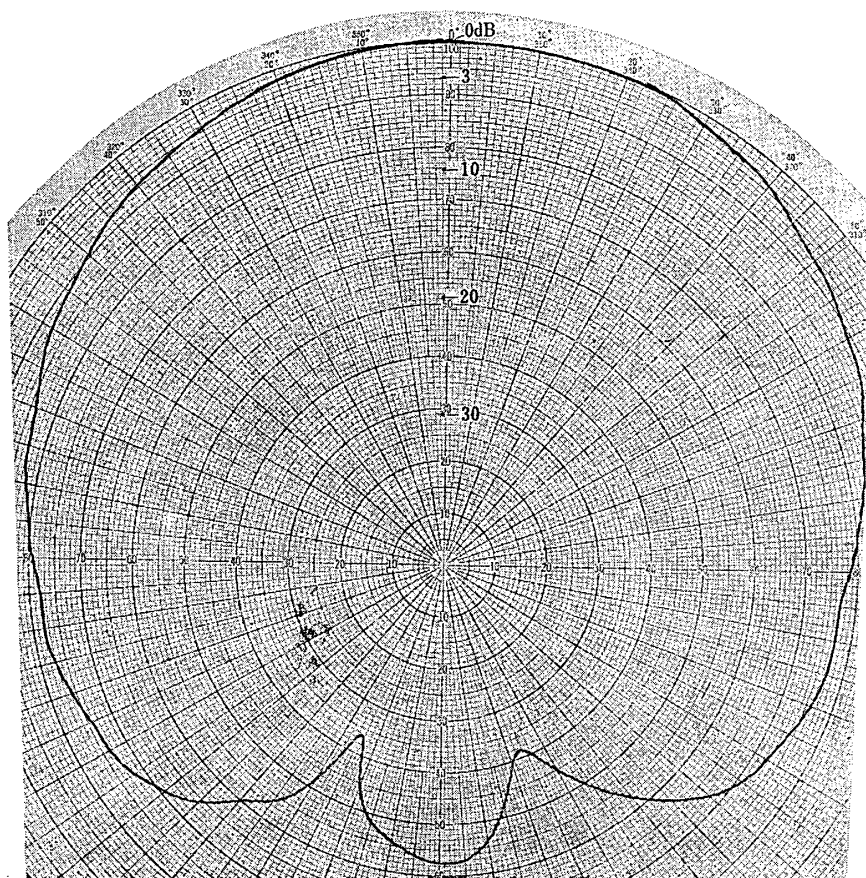


図 7d  $f=9380$  MHz, E 面実測値

表 2 ブロードサイドアレイ

	偏波面	$f$ (MHz)	サイドローブ レベル (dB)	ビーム幅 (deg.)	Back lobe (dB)	$2\theta b'$ (deg.)*
設計値	H	9380	-30.0	6.0	—	—
実測値	H	9250	-29.8	5.5	17.3	5.4
		9380	-30.7	5.5	17.1	5.0
		9440	-30.8	5.6	16.7	5.7
	E	9380	—	85.0	—	—

使用導波管 WRJ-10,  $n=16$ ,  $d=\frac{\lambda_g}{2}=22.37$

\*  $2\theta b'$ : Back lobe のビーム幅

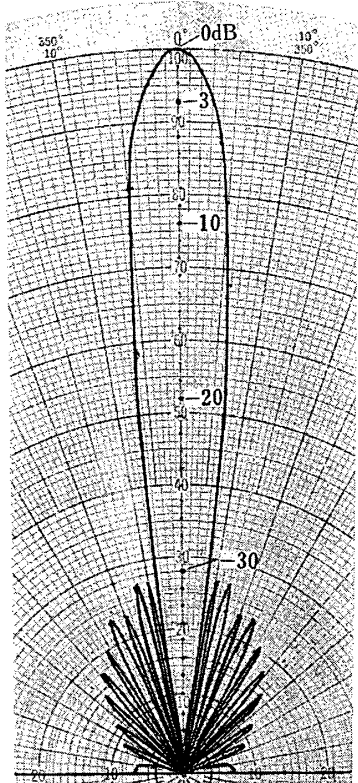


図 8 a  $f=9380$  MHz, T. T. Taylor の式による理論パターン, H 面

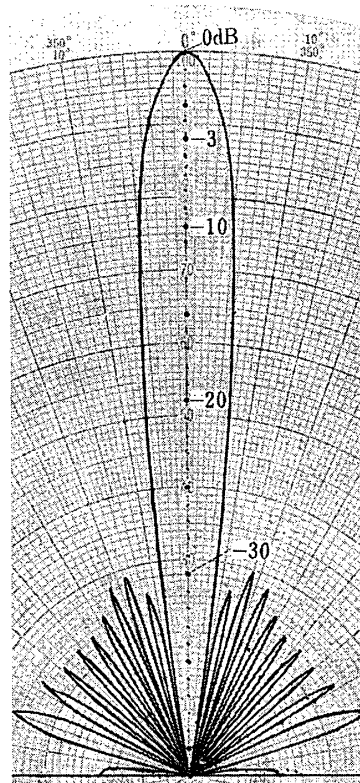


図 8 b  $f=9380$  MHz, 式 (9) による理論パターン, H 面

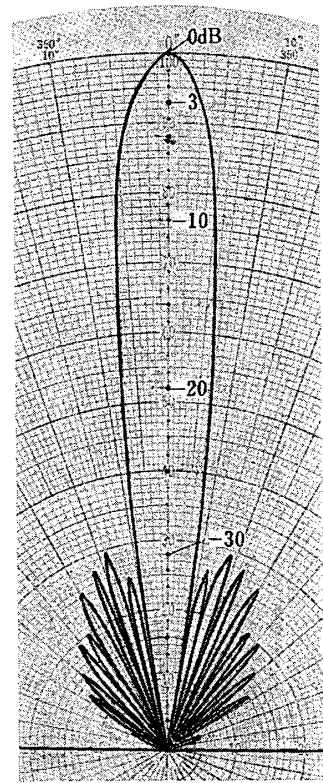


図 8 c  $f=9380$  MHz, 式 (9) で, スロット自体のパターンを考慮した時の理論パターン, H 面

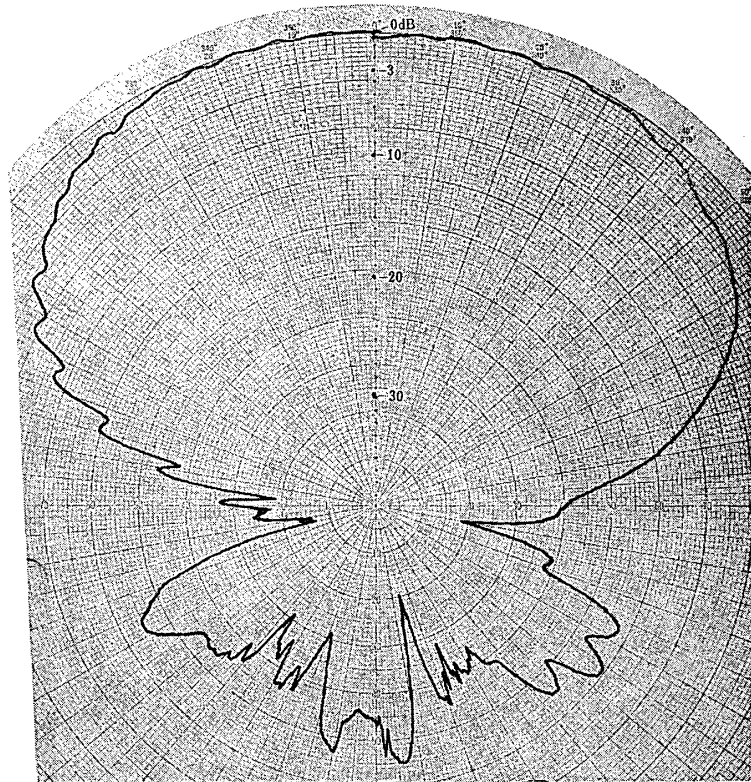


図 9 a  $f=9380$  MHz, スロット自体のパターン, H 面実測値



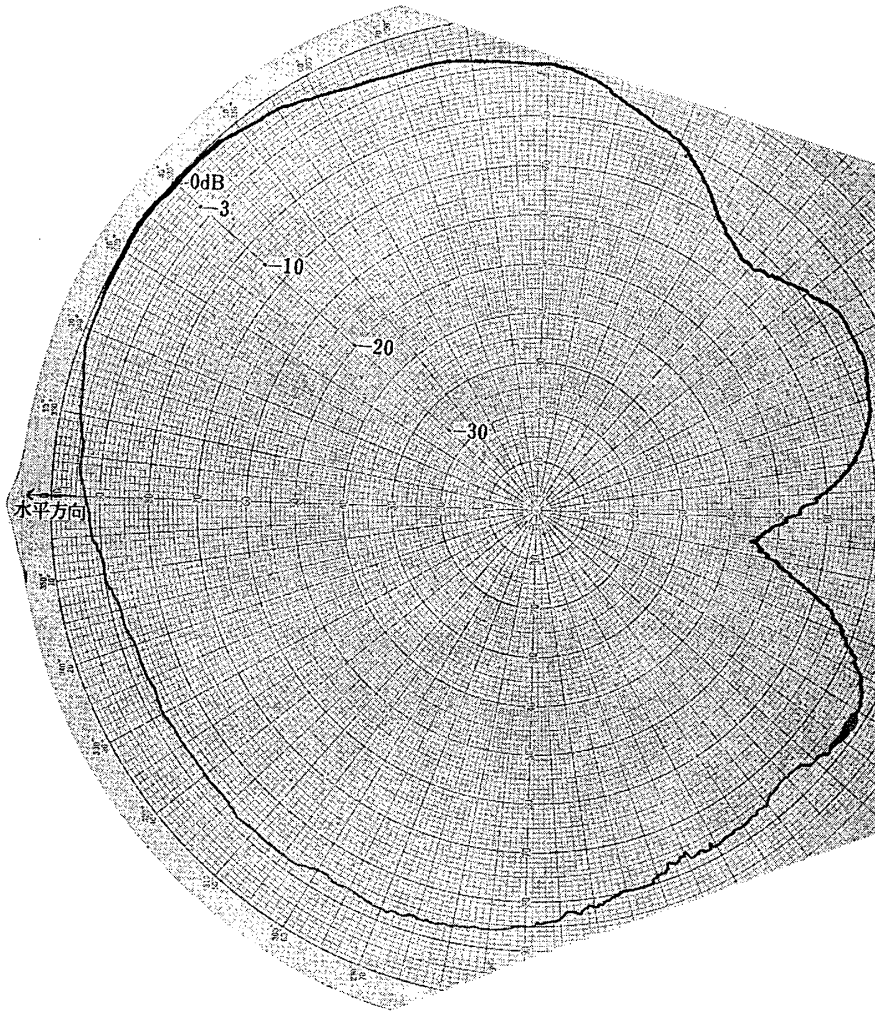
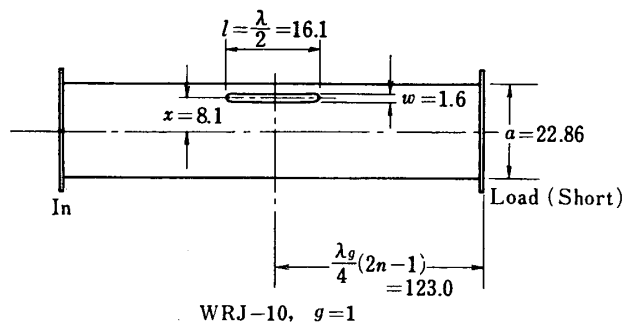


図 9 b  $f=9380\text{MHz}$ , スロット自体のパターン, E面実測値



スロット自体のパターン測定のための  
One Slot Antenna

図 9 c

描いたものを図 8c に示した.

(b) 20 度ビーム偏向アレイ (進行波型)

周波数 8500 MHz, サイドローブレベル -30 dB, ビーム幅 6 度, ビーム偏向角 20 度としたとき, 素子数は式 (4) より 20 となった. ここで, 各スロットに要求されるコンダクタンスは式 (6) によらず, 図 3 を用いた.

また, V.S.W.R 特性は図 10 の様に, また実測した輻射パターンは図 11a, b, c, d の様になった.

設計値と実測値の比較を総合して表 3 に示す. また, 式 (8), 式 (9) による理論的パターンをそれぞれ図 12 a, b に示し, 式 (9) においてスロット自体のパターンを考慮したものを図 12 c に示した.

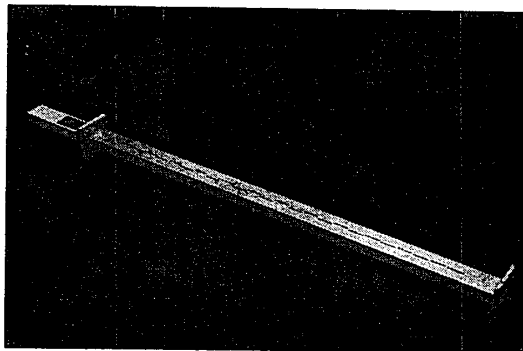


写真 b 20 度ビーム偏向アレイ

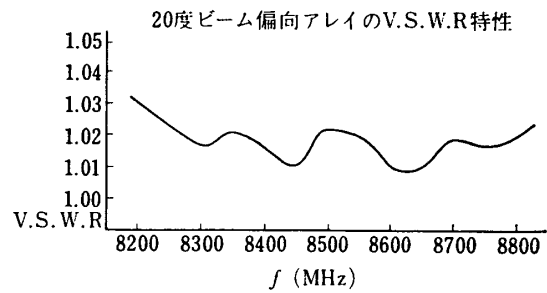


図 10

表 3 20 度ビーム偏向アレイ

	偏波面	$f$ (MHz)	サイドローブレベル (dB)	ビーム幅 (deg.)	偏向角 (deg.)	Back lobe (dB)	$2\theta b'$ (deg.)*
設計値	H	8500	-30.0	6.0	20.0	—	—
実測値	H	8200	-30.6	5.7	24.3	-12.9	5.2
		8500	-30.0	5.4	20.0	-14.1	5.2
		8800	-28.5	5.3	16.0	-14.1	5.4
	E	8500	—	42.0	—	—	—

使用導波管 WRJ-10,  $n=24$ ,  $d=18.02$

輻射効率  $\eta=0.75$  \* $2\theta b'$ : Back lobe のビーム幅

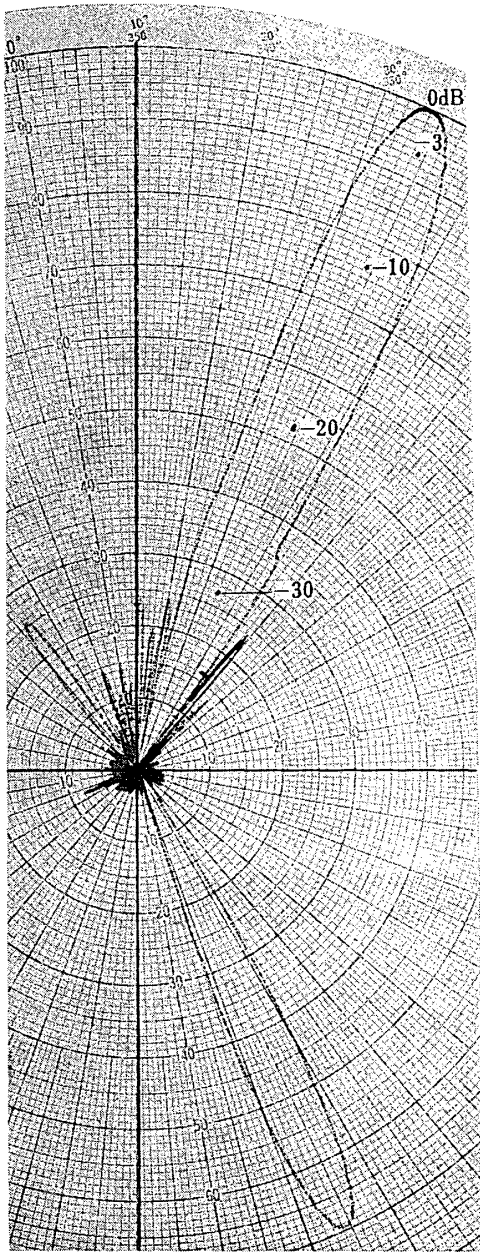


图 11 a  $f = 8200$  MHz,  $H$  面实测值

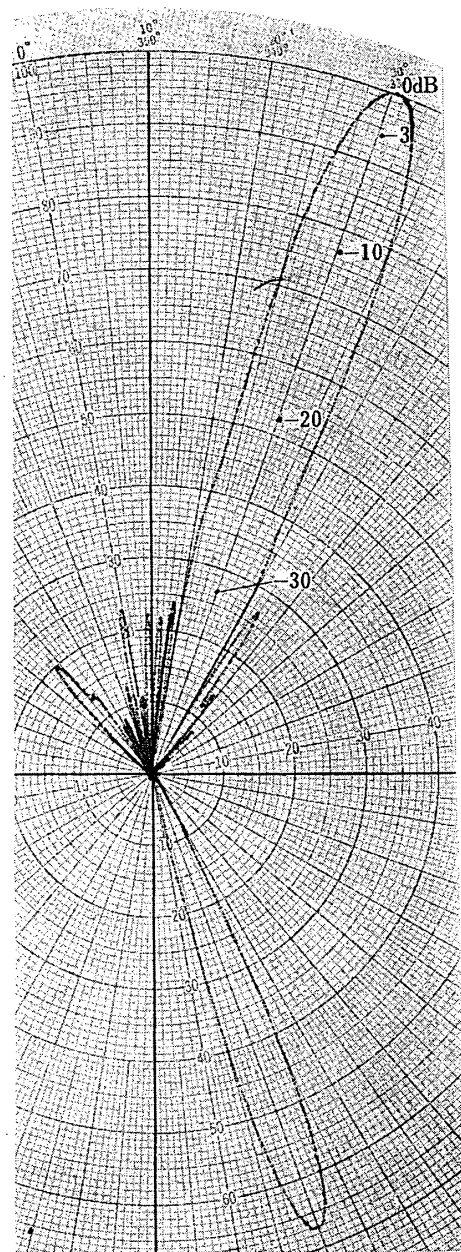


图 11 b  $f = 8500$  MHz,  $H$  面实测值

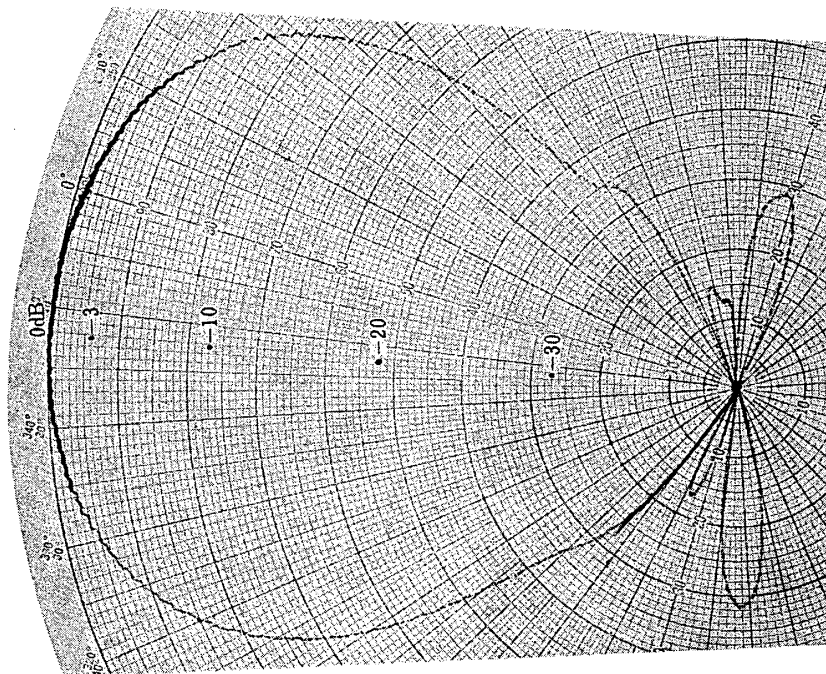


図 11 d  $f = 8500 \text{ MHz}$ , E 面実測値 (メインローブを含む面内のみ)

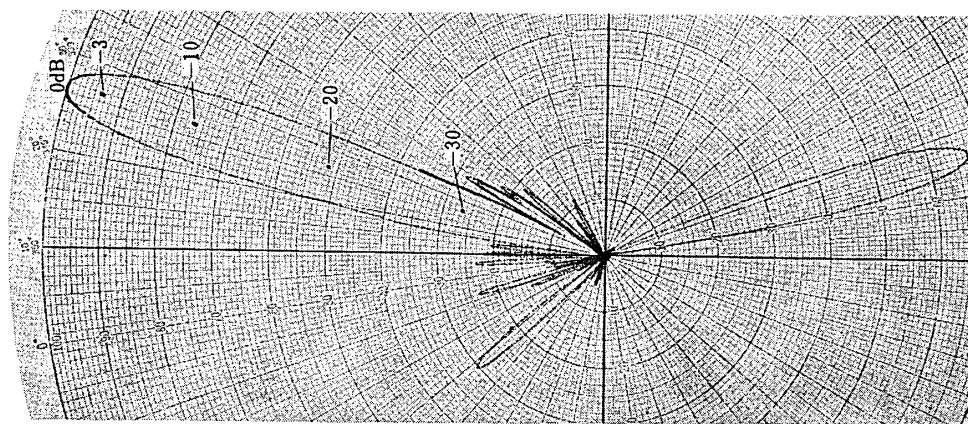


図 11 c  $f = 8800 \text{ MHz}$ , H 面実測値

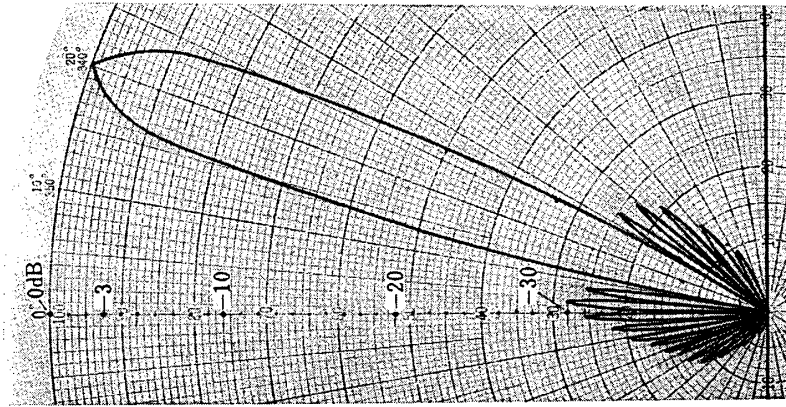


図 12 c  $f = 8500$  MHz, 式 (9) に,  
スロット自体のパターンを  
考慮した時の理論パターン

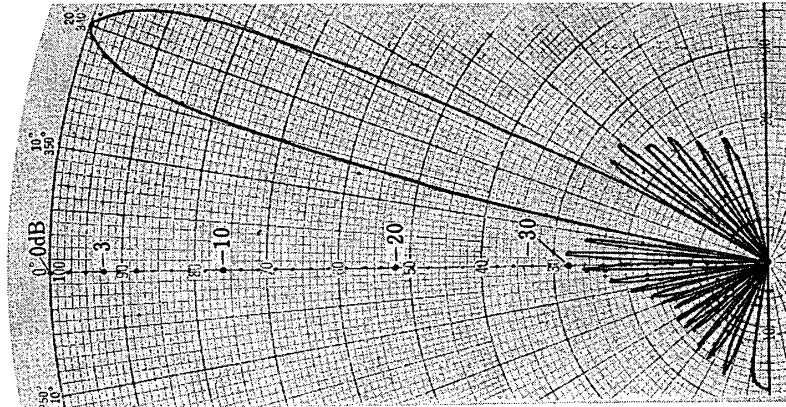


図 12 b  $f = 8500$  MHz, 式 (9) に  
よる理論パターン,  $H$  面

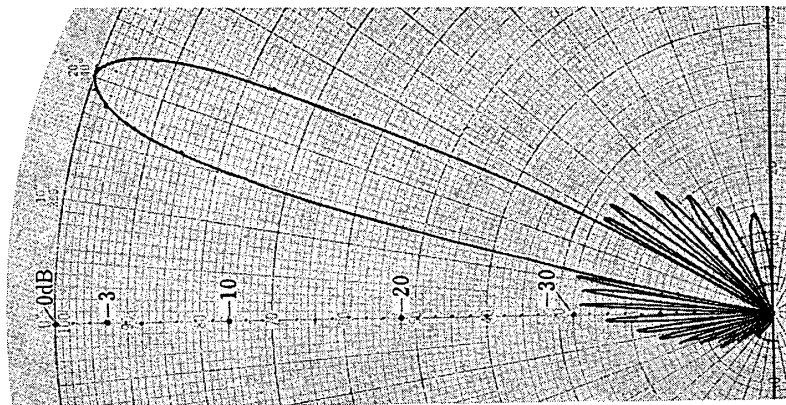


図 12 a  $f = 8500$  MHz, T. T. Taylor  
の式による理論パター  
ン,  $H$  面

## 4. む す び

表 1, 表 2 で示される様に, 設計値と実測値は非常によく一致した.

テーラー分布は連続分布であるが, 実際には不連続波源の配列であるスロットアレイにこの分布を用いて線波源とみなしても, 理論的パターンと実測したパターンに大きな違いは見られなかった.

また, この分布を用いる場合, 連続分布であるので素子数が少ない場合には問題となることが予想されるが, 実験結果 (ブロードサイドアレイ,  $n=16$ ) からではあまり問題とはならなかった. なお, スロット間の相互結合による影響は顕著ではなかった.

最後に, この研究を推進するに当たり, 御便宜をいただいた当所斎藤教授, 電波暗室の市川, 須田, 谷岡の三氏, 計算機室の宮尾氏, および当研究室竹本氏に感謝いたします.

1971 年 4 月 28 日 計測部

## 参 考 文 献

- [1] T. T. Taylor: Design of Line-Source Antennas for Narrow Beamwidth and Low Side Lobes, IRE trans. A. P vol AP-3, Jan, 1955, pp. 16~28
- [2] Curtesy Andre Dion: Nonresonant Slotted Arrays, IRE trans. A. P. vol. AP-6, Oct, 1958, pp. 360~375
- [3] The Microwave Engineer's Hand book and buyer's guide, pp. 150, 1964
- [4] E. M. T. Jones and J. K. Shimizu: A wide-Band Transverse-Slot Flush-Mounted Array, IRE trans A. P July, 1960, pp. 401~407
- [5] 飯口, 久田, 竹本: ドルフ・チェビシェフ最適分布による導波管スロットアレイ, 電子通信学会アンテナ・伝播研究会資料 A. P-70-75 (1971-03), 3月, 1971年

## 付 録

輻射界は

$$E(u, A, \bar{n}) = C \frac{\sin \pi u}{\pi u} \prod_{m=1}^{m=\bar{n}-1} \left[ \frac{1 - \frac{u^2}{\sigma^2 \left[ A^2 + \left( m - \frac{1}{2} \right)^2 \right]}}{1 - \frac{u^2}{m^2}} \right] \quad (8)$$

アンテナの開口面分布は

$$f(p) = \frac{1}{2\pi} \left\{ E(0) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} E(m) \cos mp \right\} \quad (11)$$

ただし  $E(m)$  は式 (8) の  $u$  に整数  $m$  を代入したもので  $m \geq \bar{n}$  に対しては  $E(m) = 0$  と置く.

今, サイドローレベル  $R(\text{dB})$  が 20, 25, 30 dB の場合の  $f(p)$  の例 [2] を示すと

$$\left. \begin{aligned} f(p)_{R=20\text{dB}} &= 1 + 0.260 \cos p + 0.043 \cos 2p - 0.049 \cos 3p + 0.026 \cos 4p \\ f(p)_{R=25\text{dB}} &= 1 + 0.443 \cos p - 0.011 \cos 2p - 0.013 \cos 3p + 0.010 \cos 4p \\ f(p)_{R=30\text{dB}} &= 1 + 0.581 \cos p - 0.030 \cos 2p + 0.003 \cos 3p + 0.002 \cos 4p \end{aligned} \right\} \quad (12)$$