コセカントビームホーンアレイアンテナ

中 田 和 一[†], 謝 国 章^{††}
正会員 鈴木 道 也^{††}, 正会員 小 野 光 弘^{††}
正会員 安 達 三 郎^{†††}

あらまし 幾何光学に基づいて設計した E 面コセカントビームホーンを素子アンテナとして用いた 1 次配列アレイアンテナを構成し、このアレイ化によって、サービスエリア内の電力分布の差はほぼ ± 3 dB 以内におさえた。またサービスエリア外では、サービスエリアの辺縁部から約 -3 dB/ 1° 方位角の割合で電力が弱まっていくなどの特性を持つ、質の良い SHF 小規模放送用コセカントビームアレイアンテナを実験で確認した。本論文は、このアレイアンテナの設計法、指向性計算および試作したアンテナの実験結果について述べる。

1. ま え が き

近年、都会での高層ビルや大建造物などによる放送妨害はこれら建造物の増加と共に年々増え、すでにひとつの社会問題となっている。

このような受信障害の改良は共同受信、複数送信、衛星放送などの対策が提案され、実施しているが、アンテナやテレビ回路によるゴースト改良の効果はあまり良くない。また、衛星放送による良質の画像の提供ではできるが、チャンネル数、地域の放送や経済性に難点がある。現在のところ、SHF 帯同時中継による複数送信が有効であると考えられている¹⁾。

さきに筆者らは、小規模 SHF 放送送信用アンテナに適するものとして、幾何光学 (Ray-theory) に基づいて設計された開口曲面をもつ、E, H 面扇形コセカントビームホーンアンテナについて発表してきた²⁾³⁾

本論文ではさらに、サービスエリアの広さに応じた水平面指向性を得る目的で、E面扇形コセカントビームホーンを素子アンテナとして用いてリニアアレイを

構成し⁴⁾，扇形ビームの指向性合成の実験を行ったので，これについて述べる．

2. E 面扇形コセカントビームホーン的设计法

アレイアンテナの素子アンテナとして E, H 面両方のコセカントビームホーンが考えられるが, 本論文は E 面コセカントビームホーンのみを用いてアレイアンテナを設計した. このような E 面扇形コセカントビームホーンの原理を図 1 に示す²⁾. 開口曲面の設計は幾何光学の原理を用いて行っている. 図 1 で θ_1 , θ_2 はコセカント特性の範囲を決定するパラメータ, r_0 はホーン軸長, ϕ_1 , ϕ_2 は上部および下部開口角である. 開口曲面を決定する極座標 $C(r(\psi), \psi)$ のパラメータ $r(\psi)$, ψ は次式で与えられる.

図 1 コセカントビームホーンアンテナの原理図
The geometry of cosec²-beam horn antenna.

† 新日本無線株式会社

†† 山形大学 工学部

††† 東北大学 工学部

"Consecant-Beam Horn Array Antenna" by Waichi Nakada (New Japan Radio Co., Tokyo) , Kou-Chang Hsieh, Michiya Suzuki, Mitsuhiro Ono (Faculty of Engineering, University of Yamagata, Yamagata) and Saburo Adachi (Faculty of Engineering, University of Tohoku, Sendai)

$$r(\psi) = r_0 \cdot \exp \left\{ \int_0^\psi \frac{\sin[\psi - \theta(\psi)]}{\cos[\psi - \theta(\psi)] - n} d\psi \right\} \quad (1)$$

ただし、 $\theta(\psi)$ は放射俯角で、

$$\theta(\psi) = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{\cot \theta_2 + (\cot \theta_1 - \cot \theta_2) \frac{\psi_2 - \psi}{\psi_2 - \psi_1}} \right\} \quad (2)$$

λ は自由空間波長、 a は H 面開口幅とし、 n はホーン内部の屈折率で、

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2} \quad (3)$$

3. E 面コセカントビームホーンアレイ

3.1 アレイアンテナの構成

E 面コセカントビームホーンを素子アンテナとして用いたアレイアンテナの構成を図 2 に示す。素子アンテナは x 軸上に等間隔 d で、 N 素子配列されているものとする。アレイアンテナの指向性 $F(\theta, \phi)$ は、素子間の相互結合が小さく、 m 番目の素子の励振振幅を I_m 、励振位相を ψ_m とすれば、素子アンテナの指向性 $D(\theta, \phi)$ を用い⁴⁾、

$$F(\theta, \phi) = D(\theta, \phi) \sum_{m=1}^N I_m e^{j\psi_m} e^{-jmkd \sin \theta \sin \phi} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $\phi = 0^\circ$ の垂直 E 面では $F(\theta, 0^\circ) \propto D(\theta, 0^\circ)$ であり、素子アンテナのコセカント特性が現れる。

3.2 扇形指向性の合成

H 面 ($\theta = \theta_0 \equiv \text{const}$) 内で扇形指向性を合成するため、Woodward-Lawson のサンプリング法⁵⁾を用いた。この方法は、 $\theta = \theta_0$ 、 $\phi = \phi_i$ 方向で共相励振された等間隔・等振幅リニアアレイのアレイファクタ、

$$f_i(u) = \frac{\sin \left[Nkd \sin \theta_0 \frac{u - u_i}{2} \right]}{N \sin \left[kd \sin \theta_0 \frac{u - u_i}{2} \right]} \quad (5)$$

ただし $u = \sin \phi$ 、 $u_i = \sin \phi_i$

図 2 アレイアンテナの構成
Geometry of array antenna.

を標準化関数とし、所望の指向特性をサンプリングしていくものである。すると合成された指向特性を実現するアレイファクタ $f_s(u)$ は $f_i(u)$ の重畳として、

$$f_s(u) = \sum_{i=-M}^M A_i \cdot f_i(u) \quad (6)$$

で示される。ここで A_i は、サンプル値で所望指向特性 $F_d(u)$ に対して、

$$A_i = F_d(u = u_i) \quad (7)$$

で与えられ、サンプル位置 u_i は、

$$u_i = \frac{\lambda \cdot i}{N \cdot d} \quad |i| \leq M, |u_i| \leq 1.0 \quad (8)$$

で定まる。扇形指向性特性の場合、サンプル値は成形ビーム領域で $A_i = 1$ 、それ以外の領域で $A_i = 0$ (ただし、立上り地点では $1 > A_i > 0$ に選定される) と置くことになる。しかし、実際のアレイの指向性が (6) 式のアレイファクタに素子アンテナの指向性を乗じたものとなるので、合成を行う指向性は周辺でその利得低下分を補う必要がある。

また、このとき m 番目の素子の複素振幅は次式で与えられる。

$$i_m = \sum_{i=-M}^M A_i \cdot \exp[-jkid \sin \theta_0 \cdot u_i] \quad (9)$$

4. 試作アンテナの設計

アレイを構成する素子アンテナは、研究室の設備との関連から設計周波数が 14 GHz、開口長が 12λ ($\lambda = 21.4\text{mm}$) の E 面コセカントビームホーンとした。表 1 にその設計パラメータを、図 3 には測定された放射パターンを示す。このように、E 面指向性では理想コセカント曲線にほぼ沿ったコセカント特性と仰角側での鋭い立上り特性を持ち、H 面指向性では半値幅が約 48° の広い指向性を持っている。

アレイは、素子数 $N = 8$ 、素子間隔 $d = 0.7846\lambda$ である。素子間隔 d は、相互結合を考慮しグレーティングが可視領域に入らない範囲で大きくするのが通常であるが、本構成では広角度のサンプリングに伴うグレーティングの影響を避けるためと、製作上の容易さからホーン間を密接した構造にした。

合成する扇形指向性を $F_d(u)$ とし、

表 1 素子アンテナの設計パラメータ ($\lambda = 21.4\text{mm}$)
Dimension of element antenna.

開口角(deg)			コセカント特性の範囲(deg)		開口長(λ)
ϕ_1	ϕ_2	r_0	θ_1	θ_2	m
15	35	237.4	3	40	12

図3 14 GHzにおける素子アンテナの放射指向性
Radiation pattern of element antenna at 14 GHz.

図4 F_d , f_e , F_d' の特性
Characteristics of F_d' , f_e , F_d .

$$F_d(u) = \begin{cases} 1 & \sin(-c) \leq u \leq \sin(c) \\ 0 & u > \sin(c), u < \sin(-c) \end{cases} \quad (10)$$

で表す。最大放射俯角 ($\theta=3^\circ$; $\theta=\theta-90^\circ$) の面内で指向性の合成を行う時、所望指向性 $F_d(u)$ と比べて同一面内での素子アンテナの指向性がほぼ一様とみなせる場合は、サンプリングを $F_d'(u)$ について行ってもよい。しかし実際には、アレイ指向性がアレイファクタに素子アンテナの指向性を乗じたものとなるので、ここではそれを考慮する。いま、 $c \approx 20^\circ$ の例として図4に所望指向性 $F_d(u)$ 、素子アンテナの指向性 $f_e(u)$ および両者の比較によって決定された実際にサンプリングを行う指向性 $F_d'(u)$ を示す。このように $F_d'(u)$ の周辺で指向性を持ちあげることで、素子ア

表2 サンプル位置とサンプル値
Sample locations and sample values.

番号 i	サンプル位置 $u_i = \sin \phi_i$	サンプル値 A_i
0	0.	1.
± 1	0.1593	1.0448
± 2	0.3186	0.6024
± 3	0.4779	0.
± 4	0.6372	0.
± 5	0.7965	0.
± 6	0.9559	0.

表3 励振条件
Excitation factor

素子番号 m	励振振幅 I_m	励振位相 ψ_m (deg)
1	0.0246	180
2	0.1713	180
3	0.2565	0
4	1.	0
5	1.	0
6	0.2565	0
7	0.1713	180
8	0.0246	180

図5 合成指向特性 ($c \approx 20^\circ$)
Synthesized radiation pattern ($c \approx 20^\circ$)

ンテナの指向性 $f_e(u)$ による利得低下を補っている。この時のサンプル位置 u_i とサンプル値 A_i を表2に、また、各素子の励振条件を表3に示す。図5には実現された場合のアレイの指向性を数値計算した結果を示す。

5. 実験結果および考察

前章で設計した8素子E面コセカントビームホーンアレイアンテナを試作し、その指向性合成の妥当性を確認するため実験を行った。試作したアンテナの外観は図2、その給電部は図6に示した。給電部は電力分配器および各素子アンテナへの励振位相と振幅を調

整できるための減衰器と位相器から構成される．また，各素子までの給電にはセミリジッド同軸線路を用いて行っている．

アンテナの指向性パターンは図7(a)に示すように40 m離れた両校舎の間で行った．試作アンテナと給電部とを一方の校舎屋上の回転センサを装備した回転

図 6 給電部回路
Feed system.

(a) 指向性測定

(b) 電力分布パターン測定

図 7 アンテナ指向性測定セット図
Layout of antenna pattern measurement setup.

図 8 14 GHz におけるアレイアンテナの放射指向性
Radiation pattern of array antenna at 14 GHz.

図 9 放射指向性の周波数特性
Frequency characteristic of radiation pattern.

台上に置き、検出アンテナは他方の校舎屋上の同じ高さの窓から受信した。受信レベルおよびセンサの回転角によって指向性パターンを得た。

また、図7(b)に示すように、試作アンテナは検出アンテナからの高さが6 mの回転台上に置く。検出アンテナは広い指向性を持つので、地面からの反射を考慮し電波吸収体を装着した滑車上に置く。試作アンテナの電力分布パターンの測定は検出アンテナの仰角および水平距離、試作アンテナの回転角を変えて行った。

5.1 実験結果

実験は周波数14 GHzにおけるE面指向性とH面指向性、また、周波数特性として13.5~14.2 GHzでのE面指向性とH面指向性の測定を行った。

図10 電力分布パターン (アレイアンテナ)
Power distribution pattern (array antenna).

図11 電力分布パターン (素子ホーン)
Power distribution pattern (element horn).

14 GHzにおけるE面指向性($\phi=0^\circ$)および最大放射方向($\theta=H-90^\circ=3^\circ$)でのH面指向性の実測結果を計算値と共に図8に示す。両パターンではサイドロープも-30 dB以下となっている。

周波数特性として、13.5~14.2 GHzでのH面指向特性の変化を図9に示す。E面指向性ではレベルの多少の変化が見られるが、特に大きなコセカント特性の劣化は見られない。また、H面指向特性では、主に素子間隔 d による位相因子の変化により、半値幅と立上りの勾配が変化しているのがわかる。

サービスエリア内における電力分布パターンの実験結果は図10に示す。俯角の比較的大きな領域およびエリアの端部を除けばほぼ均一な電力分布が得られた。また、エリア内の電力差はほぼ ± 3 dB以内になっていることがわかった。

図11に同寸法の単一アンテナの場合の電力分布パターンを示す。図11と図10の比較により、アレイ化によってサービスエリア内の電力平均化の効果がよくわかった。

5.2 考察

8素子のコセカントビームホーンアレイにより、半値幅が約 32° の扇形指向性の合成実験を行い、以下のことがわかった。

- (1) アレイ化によるサービスエリア内における電力の分布はほぼ ± 3 dB以内になっている。また、サービスエリア外ではサービスエリアの辺縁部から約 -3 dB/ 1° 方位角の割合で電力が弱くなっている、すなわち、送信電力は非常に有効的にサービスエリア内のみに電力を平均的に分布させることができた。
- (2) アレイアンテナへの拡張に伴った素子アンテナの垂直E面コセカント特性の大きな劣化は見られず、仰角側でのサイドロープの増大も見られなかった。
- (3) 合成されたH面扇形指向性は理論値とほぼ一致しており、成形ビーム領域での大きなリップル変動、サイドロープの増大も見られなかった。

このことから、垂直E面でコセカント特性を持つE面コセカントビームホーンを素子アンテナとして用いた1次元配列アレイによって、水平面で所望の合成指向性を持つコセカントビームアンテナが実現できることを確認できた。

試作したアンテナの寸法は、開口部分で(縦×横) $=12\lambda \times 6.7\lambda$ 、奥行が約 14λ と比較的小型で、設置がし易い簡単な構造となっている。

6. む す び

E面コセカントビームホーンをアレイに拡張し、SHF帯放送用アンテナに適した垂直E面コセカント特性を持ち、水平面では対象外への不要な放射を抑圧した扇形指向性を持つ小型アンテナを得ることができた。実験で用いた給電回路は複雑な立体回路となっているため、この部分はマイクロストリップ線路給電回路の利用が考えられる。すなわち、平面回路によるカートリッジ方式で交換が可能な給電回路とすれば、その励振条件を変えることでサービスエリアに応じた水平面指向性の制御ができるため、受信障害対策用SHF放送送信用アンテナとして、経済性、機能性においても望ましいものと成るであろう。

(昭和62年9月2日受付、昭和62年10月29日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 奥津, 青山: “テレビジョン放送技術—送信”, テレビ誌, 7(July, 1978)
- 2) 謝, 中田, 鈴木, 安達: “Ray-theoryによるE面コセカントビームホーンアンテナの設計とその放射特性”, 信学論(B), J64-B, 5(May, 1981)
- 3) 謝, 佐藤, 鈴木, 安達: “誘電体そう入H面扇形コセカントビームホーンアンテナの設計とその放射特性”, 信学論(B), J65-B, 10(Oct., 1982)
- 4) 謝, 中田, 鈴木, 安達: “コセカントビームホーンアンテナを用いたアレイアンテナの特性”, テレビ学技報, RE 82-5(Feb., 1982)
- 5) L. S. Warren and G. A. Thiele: “Antenna Theory and Design”, John Wiley & Sons(1981)

なかた かいち

中田 和一 昭和57年, 山形大学電気科大学院修士課程修了。同年, 新日本無線㈱に入社。マイクロ波集積回路, 固体デバイスの開発に従事。59~62年, 青年海外協力隊員としてコスタリカ共和国工科大学電子工学科にて主にマイクロ波工学の指導を行う。

しば くによろ

謝 国章 昭和42年, 台北工専電機卒業。49年, 山形大学電気工学科大学院修士課程修了。同年, 同工学部電子工学科助手となり, 現在に至る。開口面アンテナ, マイクロ波素子, およびSQUIDによる神経磁位計測等の研究に従事。60~61年, アメリカコロラド大学客員研究員。工学博士。

すずき みちや

鈴木 道也 昭和17年, 米沢高等工業学校(現, 山形大学工学部)通信工学科卒業。通信省, 海軍技研等を経て, 米沢工専助教授。37年より, 山形大学教授となり, 現在に至る。高周波応用, 雪上伝搬, アンテナ等の研究に従事。工学博士。正会員。

おの みつひろ

小野 光弘 昭和36年, 山形大学工学部電気工学科卒業。同年, 日本無線㈱に入社。37年, 山形大学工学部電気工学科助手, 46年, 同電子工学科助教授となり, 現在に至る。電波吸収体, 開口面アンテナ, 電子スピン共鳴装置, 磁気による神経の無侵襲計測等の研究に従事。工学博士。正会員。

あだち さぶろう

安達 三郎 昭和33年, 東北大学通信工学科博士課程修了。アンテナ, 電磁波の散乱, 回折, 伝搬, プラズマ中の波動放射, 伝搬の研究に従事。現在, 東北大学工学部教授。工学博士。正会員。

Magnetic Focusing and Electrostatic Deflecting Camera Tubes with Twisted Pattern Yokes

by *Kentaro Oku, Masakazu Fukushima and Yoshinori Okamura*

Magnetic focusing and electrostatic deflecting (MS) camera tubes have been investigated concerning a twist angle of the Pattern yoke and the shielding electrode for deflection field near the electron gun by calculating the deflection electrostatic field using the variable separation method.

It was found that a twist in the pattern yoke by 30 degrees reduces the beam spreads due to deflection aberrations and improve the resolution uniformity over the raster. It was also found that the shielding electrode is efficient for improving resolution.

The 2/3 inch MS camera tubes based on the calculation are fabricated and show good resolution. The performances of the tubes are found to be in very good agreement with calculations. Cameras using the tubes are also fabricated. The optimization of the MS electron beam systems have been established.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 42, No. 2 (1988) 154~161

Cosecant-Beam Horn Array Antenna

by *Waichi Nakada, Kou-Chang Hsieh, Michiya Suzuki,
Mitsuhiro Ono and Saburo Adachi*

Using a nonplanar aperture-type E-plane cosecant beam horn as an element antenna of a cosecant-beam array is proposed.

The experimental results show that the radiation field density in the service area is under $\pm 3\text{dB}$ and the service area spill over is very small.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 42, No. 2 (1988) 162~167

会誌編集委員会企画委員会の構成

編集長	大越 孝敬 (東 大)	編集幹事	江藤 良純 (日 立)	岸野 文郎 (N T T)
副委員長	三橋 哲雄 (N H K)		川崎 健生 (日 電)	小林 希一 (N H K)
	原島 博 (東 大)		古角 尚之 (東 芝)	羽鳥 好律 (K D D)
			吉田 豊彦 (東京放送)	富田 良二 (日本テレビ)
			倉重 光宏 (N H K)	斉藤 勝也 (N H K)