

3ビームの放射電磁波空間重畳合成の検討

日大生産工(院) ○飛内 雅之
日大生産工 田中 將義

1 まえがき

同一周波数の高周波信号(RF)を低損失でベクトル合成が可能となれば、新たな通信方式が可能となる。合成法として、ハイブリッド回路等のマイクロ波回路で合成する場合には大きな損失を伴う、そこで筆者等は、これまでに空間で重畳合成する方法を提案し、2ビームで実現可能であることを報告してきた。(1-7)

この空間重畳合成技術を用いて多ビームの合成を行う場合、ビーム間の利得・位相差が小さいことが要求され、筆者等はフェーズドアレイのアンテナ素子を同心円状素子配置とすることで2ビームの空間重畳が実現可能であることを報告し、この技術は多値変調波の高効率電力増幅等に有効であることを示した。

本報告では、新たな通信方式を提案するために、3ビームを空間重畳合成する検討を行い(8)、空間重畳可能範囲を明らかにし、その実現性を検討したので報告する。

2 空間ベクトル重畳合成

2.1 3ビーム空間ベクトル重畳合成の適用例

3ビームを合成することにより実現可能となる適用例をFig.1, 2に示す。

Fig.1では2つの4相位相変調波(QPSK)と2相位相変調波(BPSK)を合成することで多値変調波である32値振幅位相変調(APSK)波を作ることが可能となる(9)。Fig.2では3つのオットQPSK(OQPSK)波を合成することにより、多値変調波の64値直交振幅変調(64QAM)が可能となる。これらの例が実現すれば、振幅変動の小さい変調波を高効率で電力増幅後に送信・合成が可能となる。

回路を用いてFig.1, 2のような合成を行う場合には、Fig.3で示すように送信電力増幅後、各S1, S2, S3は1/2, 1/4, 1/4となり、重畳合成は大きな損失が生じるため、実現が不可能となる。

そこで、回路での合成ではなく、Fig.4に示す損失のない、空間で合成する空間重畳合成を検討した。

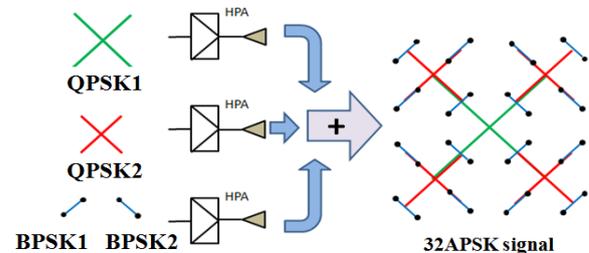


Fig.1 Spatial Superposition of three electromagnetic waves (32APSK)

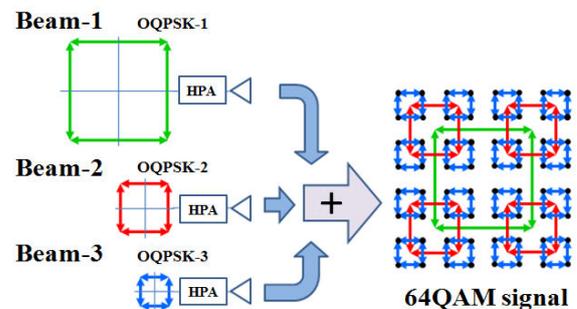


Fig.2 Spatial superposition of three electromagnetic waves (64QAM)

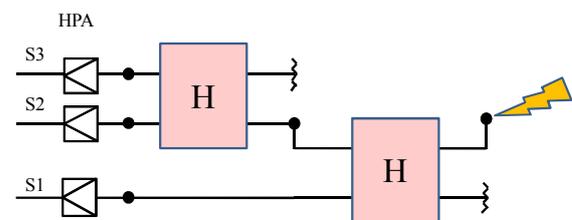


Fig.3 Superposition of radio waves by circuits

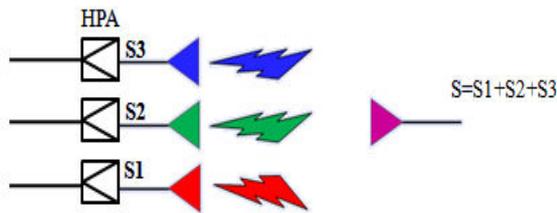


Fig.4 Spatial superposition of radio waves

2.2 受信点におけるビーム経路差による空間重畳誤差

3ビームを重畳合成する技術として空間領域でビームを合成する空間重畳合成は、回路での合成と違い損失はない。しかし、空間合成時にビームの経路差により受信点で空間重畳誤差が発生する問題がある。これは、Fig.5に示すようにそれぞれ異なる点から送信されるために、受信点までの経路差が異なり、位相差が発生する。この重畳誤差により、ベクトル合成が変形し、通信特性が劣化する。そこで、経路差を小さくする必要がある。

2.3 個別アンテナによる合成時の位相誤差

3つの個別アンテナで合成した場合について、放射角度の増加に伴う位相誤差の変化を検討した。この結果をFig.6に示す。素子間隔が広がると、放射角度の増加とともに経路誤差が増加し位相誤差がより大きくなることが確認できる。つまり、位相誤差を小さくするには、送信点間隔を小さくすることが重要となる。

3 空間重畳合成用フェーズドアンテナ

3.1 従来技術と提案技術のレイ配置

Fig.7の左図は従来の格子状フェーズドアンテナの配置である。この格子状レイ配置で空間重畳合成を行う場合、同一ビームの素子間隔が広がるため、3ビームの送信点が異なり位相誤差が発生する。

そこで、この位相誤差を低減するレイ配置としてFig7の右に示す3ビーム空間重畳合成用のレイ配置を提案した。

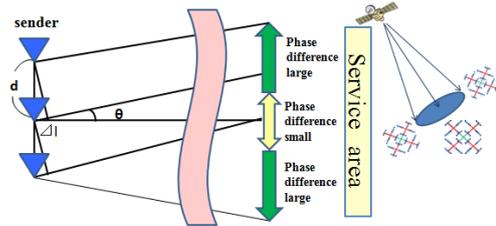


Fig.5 Spatial Superposition error and its effect

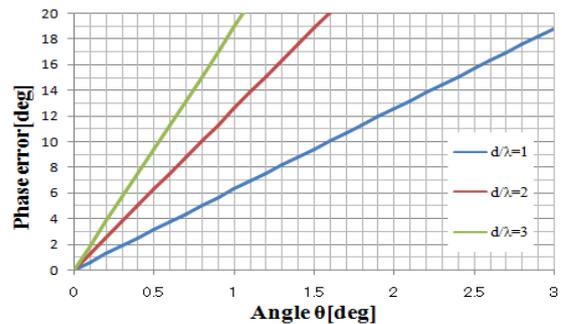


Fig.6 Phase error versus radiation angle as a parameter of distance between transmitting points

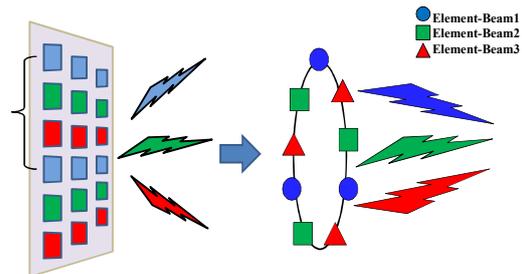


Fig.7 Array configuration of conventional and proposed system

3.2 3ビーム空間合成用フェーズドアンテナの特徴

3ビーム空間合成用アンテナは、Fig.8に示すように同心円状に素子を配置している⁽⁸⁾。この配置により3つのビームの等価的な送信点が同一になる。

今回は、多重リングではなく1重のシングルリングで、3ビームごとに3素子を交互に配置した合計9素子からなる構成を検討した。

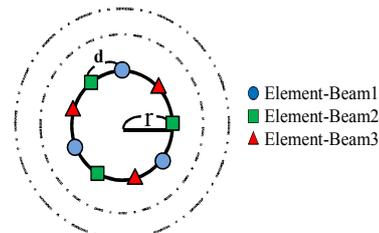


Fig.8 Array antenna of spatial superposition of three electromagnetic waves

4 ビームの放射パターン

アレイアンテナの放射ビームパターンの総合特性 $G(\phi, \theta)$ は(1)式で与えられる。ここで、 $G_A(\phi, \theta)$ はアレイファクタ、 $G_P(\phi, \theta)$ は各アンテナ素子の特性である。

$$G = G_A(\phi, \theta) \times G_P(\phi, \theta) \quad (1)$$

今回は同一特性のアンテナ素子を使用することを前提とすると、ビーム間の誤差を考える場合、アレイファクタ $G_A(\phi, \theta)$ の差に着目すれば良い。

各ビームのアレイファクタのパターンは(2)(3)式より与えられる。

$$G_A(\phi, \theta) = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{k=0}^{K_i-1} A_{ki} \exp \left\{ j \left(\partial_{ki} - \frac{2\pi}{\lambda} R_i \cos(\phi - \phi_{ki}) \sin \theta \right) \right\} \right] \quad (2)$$

$$\partial_{ki} = \frac{2\pi}{\lambda} R_i \cos(\phi_0 - \phi_{ki}) \sin \theta_0 \quad (3)$$

ϕ は方位角、 ϕ_0 は目標方向への方位角、 θ はボアサイトからの角度、 θ_0 は目標方向へのボアサイトからの角度、 A_{ki} は振幅、 K は素子数、 R_i は半径、 N は円の多重数、 λ は波長である。

5 各ビームの利得・位相パターン

アレイアンテナの実装性を考慮して、アンテナ素子間隔を $d=0.7\lambda$ とした構成を検討した。

Fig10にBeam-1, 2, 3ごとの遠方界アレイファクタの利得と位相パターンを示す。利得は色で示しており、赤色に近づくにつれ、利得が高く、青色に近づくにつれて利得が低くなることを表している。Fig.10のGain patternより、ボアサイト方向である中心部は、Beam-1, -2, 3ともほぼ同一となっている。3つのビームの等価的な送信点が同一であるが、中心から離れるにつれて、経路差による空間重畳誤差が発生する。位相についても、中心部において、Beam-1, -2, 3の値はほぼ近い値を示している。

6 3ビーム間の利得・位相の誤差

通信に空間重畳技術を適用した場合の、許容される重畳誤差として、利得差は1.0dB以内、位相差は10度以内であることが報告されている⁽¹⁰⁾。

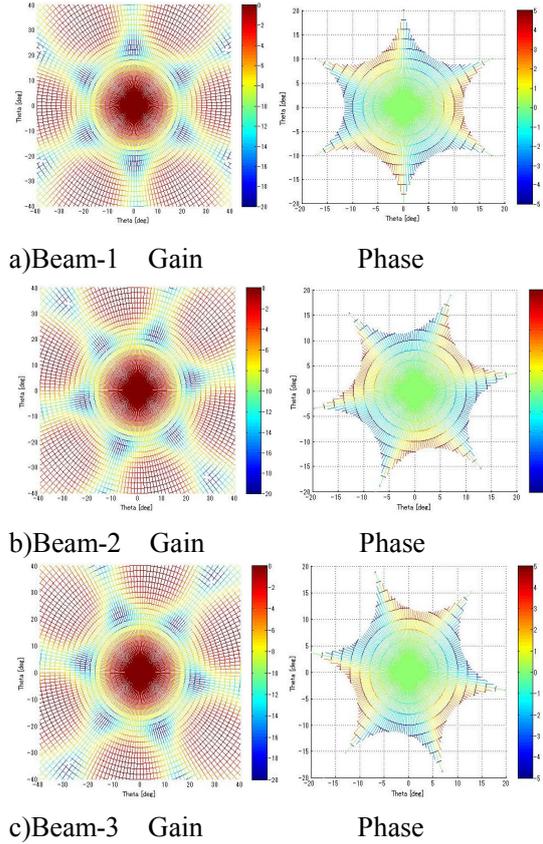


Fig.10 Two-dimensional beam pattern of gain and phase

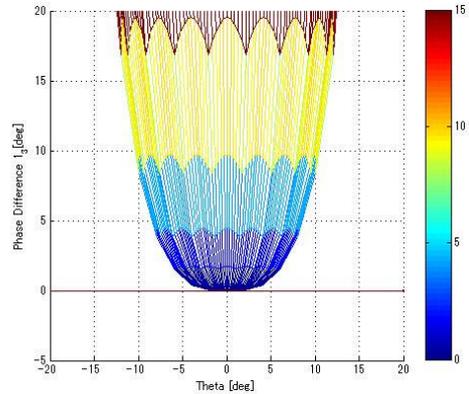


Fig.11 Phase errors among Beam-1,2,and 3

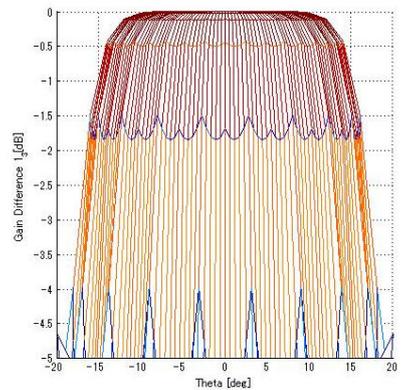


Fig.12 Gain errors among Beam-1,2,and 3

Beam-1,2,3 間の利得と位相の最大誤差を Fig. 11, 12に示す. Fig.11より, 位相誤差が 10° 以内となる角度 θ は $\pm 12^\circ$ の範囲である. Fig.12から, 利得誤差が1.0dB以内となる θ は $\pm 15^\circ$ の範囲であることが分かる.

7 サービスエリアの検討

7.1 衛星通信時のサービスエリア

衛星通信では通信距離は36,000kmとなる. 許容位相誤差を 10° とすると, 本技術では放射角度は $\pm 12^\circ$ まで可能である. これに対して 2.3で示した個別アンテナを使用した時には, 素子間隔が $d/\lambda=2, 3$ の時, それぞれ 0.4° と 0.3° となった. これらの結果をもとに, サービスエリア半径について考察した結果をTable1に示す. 本技術では7652km, 個別アンテナではそれぞれ503km, 346kmとなった. このことから提案した技術は従来技術よりも重畳誤差が減少し, サービスエリアが拡大できる. 静止衛星を用いた通信においては, この空間重畳が可能な範囲が大きく, 十分なエリアをカバーできることが明らかとなった.

7.2 地上通信時のサービスエリア

近距離通信に適用した時の性能比較を Table2に示す. ここでは地上通信時を考慮した. 許容位相誤差を 10° , 通信距離を10kmとした時のサービスエリア半径は, Table2に示すようにそれぞれ2.13km, 0.14km, 0.01kmとなり, この範囲内の近距離通信時で本技術が使用可能であることが明らかとなった.

Table1 Comparison of service area in case of satellite communications

Satellite communication		Angle θ [rad]	Service area R[km]
Proposed		12	7652
Conventional	$d/\lambda=2$	0.8	503
	$d/\lambda=3$	0.55	346

Table2 Comparison of service area in case of terrestrial communications

Terrestrial communication		Angle θ [rad]	Service area R[km]
Proposed		12	2.13
Conventional	$d/\lambda=2$	0.8	0.14
	$d/\lambda=3$	0.55	0.01

8 まとめ

本報告では, 同一周波数の3つの高周波(RF)ビームを低損失でベクトル合成する空間重畳合成法を提案した. 回路を用いた合成法と比べて, 低損失に実現できる. 空間重畳合成法の固有の問題として重畳誤差が発生する. この重畳時の利得と位相誤差の低減が課題であり, 多重リング状のレイアウトを提案し, 3ビームのベクトル合成を検討した.

この結果, 円周状にアンテナ素子間隔 $d=0.75\lambda$ の等間隔で9個の素子を配置したフェーズドレイアウトアンテナを用いて3ビームの空間重畳を行い, 振幅誤差1dB,位相誤差10[deg]のビーム間誤差を満足する空間重畳範囲は $\pm 12[\text{deg}]$ である. 衛星通信において, この値は十分な範囲であり, 衛星通信に適用可能であることを明らかにした.

今後は, レイアウト素子の振幅の重み付けの効果, 多重リング状, 設定誤差, バラッキによるビーム間利得・位相誤差への影響を検討していく.

[参考文献]

- 1)M.Tanaka,AIAAICSSC2003,AIAA-2003-2288, 2003, April.
- 2)田中將義, シミュレーション, 第24巻, 1号, pp75-82, 2005.
- 3)M.Tanaka,AIAA,ICSSC2005,1000249, 2005, Sept.
- 4)M.Tanaka,&T.Eguchi,AIAA,ICSSC2006, AIAA-2006-5347,2006,Jun.
- 5)江口拓弥, 田中將義, 信学総大, B-1-47, 2006.
- 6)M.Tanaka,H.Madate,AIAA,ICSSC-2010-8681,2010, August.
- 7)間館, 田中,信学技報, SAT2010-85,2011-2
- 8)飛内, 田中, 信学会サテライト大,B-3-18,2011
- 9)渡辺,田中,信学会サテライト大,B-3-19,2011
- 10)Tanaka,H.Madate,AIAA,ICSSC-2011,2011, Nov.