

重畳型多値変調を実現する空間重畳電力合成法の研究

日大生産工（院） ○江口 拓弥
日大生産工 田中 将義

1. はじめに

16QAM や 64QAM 等の多値変調は 1 シンボル当りの情報量が多く、1 度に多くの情報が伝送可能となり、周波数の有効利用ができる。反面、被変調波の振幅変動が大となるため電力増幅器(HPA)に高い線形性が要求され、線形性確保のため出力をバックワする結果、電力増幅効率が低下する課題がある。

この問題を解決する方法として空間重畳型多値変調が検討されている^{[1][2][3]}。複数の QPSK 信号を独立した複数の HPA で個別に増幅後、重畳合成し M 値 QAM 信号を生成する方式である。QPSK 波は振幅がほぼ一定であることから、QAM 波と比べ、HPA を効率の良い非線形領域近傍で動作させることが可能となる。

この方法の実現には空間で複数被変調波を重畳合成する技術が必要となる。そこでフェイズドアレイにより 2 ビームを空間上で電力合成する方法を提案している^{[4][5][6][7]}。本報告ではフェイズドアレイの構成と重み付けによる特性改善を明らかにするとともに、実運用を考慮してステアリング時の特性、各アレイ素子への給電信号の設定誤差による影響、素子故障の影響とその補償法を検討し、空間重畳電力合成法の実現性を明らかにする。

2. 空間重畳用フェイズドアレイシステムの構成

2・1. 空間重畳誤差の影響と許容条件

空間重畳型 16QAM の構成を Fig.1 に示す。Fig.1 に示すようにレベルが 6[dB]異なる 2 つ

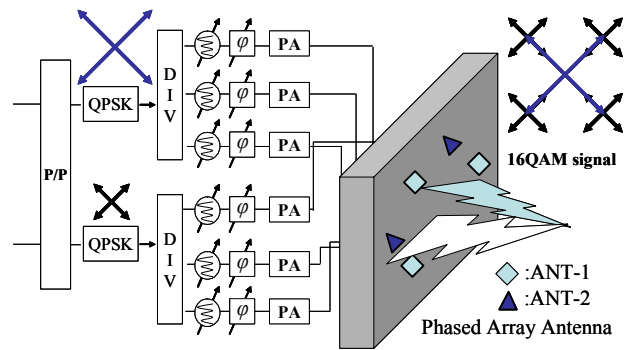


Fig.1 Configuration of spatially superposed 16QAM Modulation system

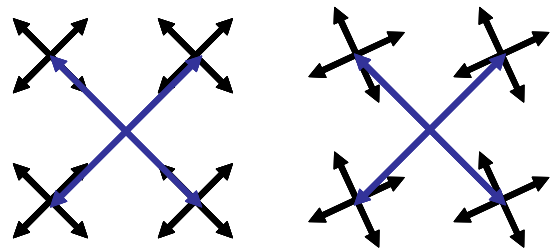


Fig.2 Influence of spatially superposed error

の QPSK 波を HPA で個別に増幅後、フェイズドアレイにより空間重畳合成することで 16QAM 波を生成する。

しかし空間重畳により回路合成損を回避できる反面、2 ビーム間の利得と位相差により空間重畳誤差が生じ、性能劣化を受ける。したがって、空間重畳誤差の小さいフェイズドアレイの実現が要求される。

Fig.2 は 16QAM の信号配置に空間重畳誤差のため位相回転が生じた様子を示している。デジタル変調では信号配置が多少劣化しても誤り訂正符号により、誤りを検出・訂正することが可能である。

誤り訂正を考慮した伝送特性より導出した両ビーム間の利得差および位相差の許容条件を Table 1 に示す^[3]。この利得・位相差の許容条件を満足するアレイシステムを明らかにする。

2.2. 同心円状アレイアンテナの構成

Fig.3 に空間重畳用アレイアンテナシステムの構成を示す^[4]。同心円状に素子を配置したアレイアンテナで構成される。両ビームとも6素子の素子で構成され、四角および三角で示す素子から各々のビームが放射される。同一円周上の素子間隔は互いに等しく、最小素子間隔は d となっている。

両ビームのアンテナ素子の基準点は円の中心であり、基準点が等しい。これにより2ビーム間の利得と位相差を小さくすることができる。各ビームパターンは次式で与えられる。

$$F(\phi, \theta) = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{k=0}^{K-1} A_{ik} \exp \{j(\phi_{ik} - \beta_{ik})\} \right] \quad (1)$$

$$\phi_{ik} = \frac{2\pi}{\lambda} R_i \cos(\phi_0 - \phi_{ik}) \sin \theta_0$$

$$\beta_{ik} = \frac{2\pi}{\lambda} R_i \cos(\phi - \phi_{ik}) \sin \theta$$

但し、 ϕ は方位角、 θ はホアサイトからの指向角度、 ϕ_0, θ_0 は主ビームの設定方向、 ϕ_{ik} は各素子の極座標、 A_{ik} は振幅、 K は素子数、 R_i は半径、 N は多重数である。

2.3. ビームパターンと空間重畳可能範囲

Fig.4 は Fig.3 に示すアレイアンテナに振幅が一樣の信号を給電した時のビームパターンである。通常、 $d = 0.5\lambda$ を用いるのが一般的であるが、本研究では実装性を考慮し $d = 0.75\lambda$ に拡大している。左側に利得、右側に位相を示す。上段がビーム1、中段がビーム2、下段に両ビーム間の差をとった。これをみると両ビームの利得は同一となっており、全領域において完全に一致していることが分かる。また位相は中心付近において一致しており、両ビーム間の位相差を見ると、中心から指向角度約 $8[\text{deg}]$ において位相差 $15[\text{deg}]$ となり許容条件を満足できる。

Table1 Allowable combining errors

Gain difference of two beam	1[dB]
Phase difference of two beam	15[deg]

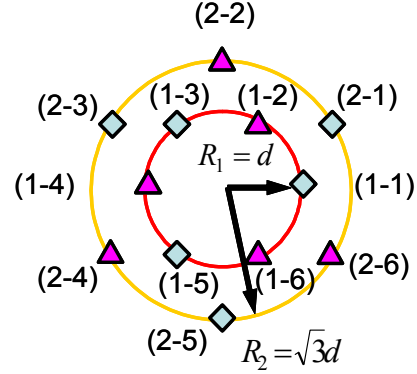


Fig.3 Configuration of phased array system

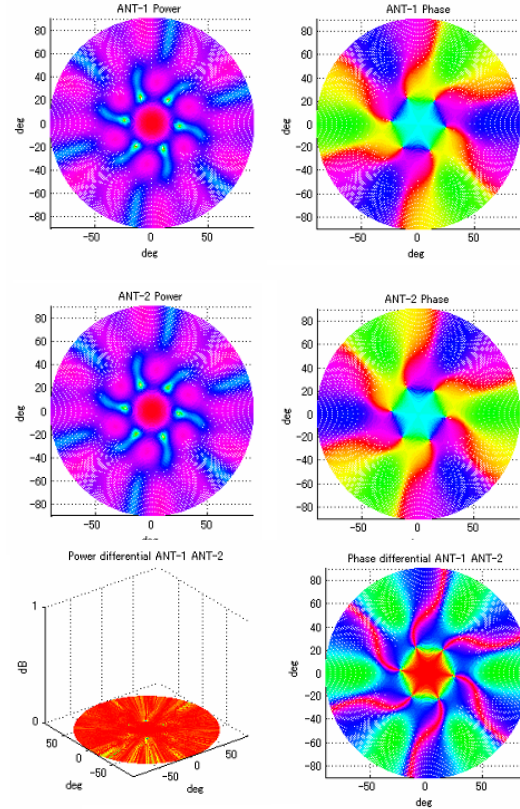


Fig.4 Beam patterns

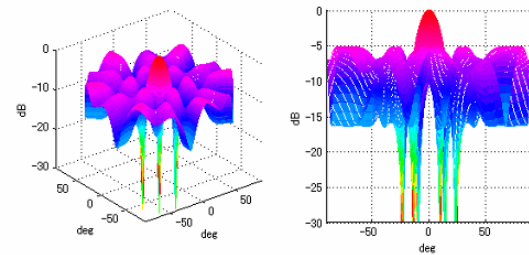


Fig.5 3-D beam patterns

なお以降、許容条件を満足する中心からの指向角度を空間重畳可能範囲と呼ぶ。

3. サイドローブ低減の検討

均一給電の同心円状素子配置はサイドローブが高いという欠点がある。Fig.5 に3次元のビームパターンを示す。そこで振幅比 A_{2k}/A_{1k} を変化し、励振振幅の重み付けを行い、サイドローブの低減を検討した。

Fig.6 に重み付けの結果を示す。

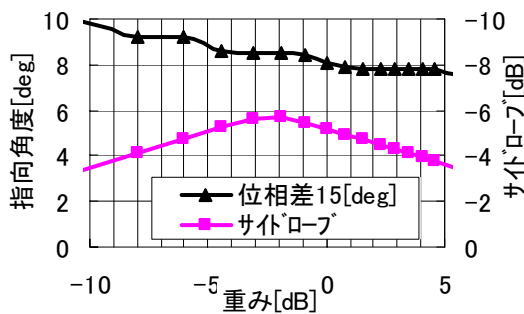


Fig.6 Beam pattern characteristics for various amplitude weights

横軸を重み、縦軸に空間重畳可能範囲とサイドローブレベルを示す。重み-2[dB]においてサイドローブレベルは最小となる。これに対し位相差15[deg]を満足する指向角度は重みに対し単調変化を示す。なお利得差1[dB]は重みに関わらず常に満足する。よって位相差15[deg]以内の指向角度が空間重畳可能範囲となる。

4. ステアリング時の空間重畳可能範囲の検討

アレイアンテナではビームの方向を変化させること (steering) が可能である。(1) 式に示すビームパターンの指向角度 θ_0 を変化させたときの空間重畳可能範囲を検討した。

Fig.7 に目標角度 θ_0 を変化させたときの θ に対する両ビーム間の位相差を示す。

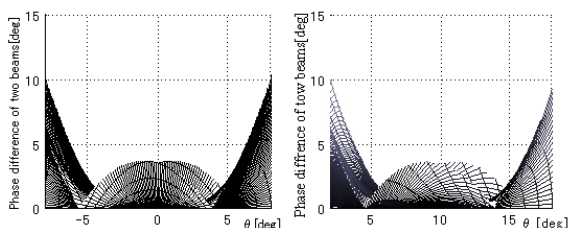


Fig.7 Phase difference of two beams

左図が $\theta_0 = 0[\text{deg}]$ 、右図が $\theta_0 = 10[\text{deg}]$ である。縦軸に位相差、横軸は θ で θ_0 を中心に 8[deg] の範囲を表示した。

両図とも両ビーム間の位相差が 15[deg] 以内となる範囲は θ_0 を中心に約 8[deg] で差異がない。また両ビーム間の利得は θ_0 を変化しても完全一致していることから θ_0 を 10[deg] にステアリングしても空間重畳可能範囲に変化がない。

5. アンテナ素子の利得・位相の許容設定誤差

実運用時には各素子の給電信号に振幅・位相の設定誤差が生じるため、設定誤差による空間重畳可能範囲への影響を検討した。(1) 式の利得 A_{ik} 、位相 $(\alpha_{ik} - \beta_{ik})$ の設定誤差の範囲をそれぞれ ΔA 、 ΔP とし、設定範囲内で振幅、位相をランダムに生成した。

Fig.8 に設定誤差と空間重畳可能範囲の関係を示す。横軸は位相設定誤差 ΔP 、縦軸は空間重畳可能範囲を示し、振幅設定誤差 ΔA をパラメータとしている。

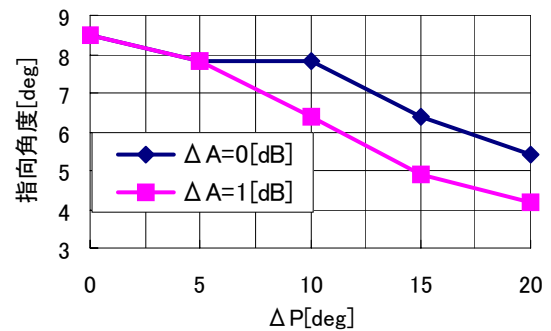


Fig.8 Effect of gain and phase errors on beam pattern

設定誤差がない $\Delta A = 0$ 、 $\Delta P = 0$ において空間重畳可能範囲は約 8.5[deg] であり、 $\Delta A = 1[\text{dB}]$ 、 $\Delta P = 15[\text{deg}]$ 許容すると、空間重畳可能範囲は約 3.5[deg] 減少する。

6. 素子故障時の影響と補償法の検討

実運用では素子の故障が考えられる。各素子が故障した際の空間重畳可能範囲への影響を明らかにし、補償法を検討した。

6.1. 素子故障時の空間重畳可能範囲

Fig.3 に示すビーム1の各素子の故障による空間重畳可能範囲への影響を検討した。

Table2 に素子の故障箇所と位相の許容条件を満足する指向角度, 正常時との総利得比および両ビーム間の利得差を示す。

Table2 Effect of element failures on beam pattern

故障素子	位相差 15[deg]とな る指向角度	正常時と の総利得 比[dB]	両ビーム間 の利得差 [dB]
なし	8.5	0	0
(1-1)	6.5	-2.7	1.8
(1-3)	5.7	-2.7	1.8
(1-5)	7.7	-2.7	1.8
(2-1)	6.2	-1.5	1.4
(2-3)	5.7	-1.5	1.4
(2-5)	7.6	-1.5	1.4

故障素子により両ビーム間の位相差 15[deg]となる指向角度への影響が異なり, 正常時と比べ最大で 2.8[deg]減少し, 5.7[deg]となる。また外側に比べ内側の素子の方が総利得への影響が大きく, 内側の素子の方が全体への利得に大きく寄与していることが分かる。両ビーム間の利得差は 1.8[dB]となり 1 素子故障時には利得差の許容条件を満足できない。

6.2. 補償法の検討

上記に示すようにビーム1の(1-3)素子が故障したと仮定すると, これにより両ビーム間の利得差が 1.8[dB]となり許容条件を満足できない。そこで正常なビーム2の素子を停止することで, 両ビーム間の利得差を 1[dB]以内とする補償法を検討する。

Table3 にビーム2の正常素子停止による補償結果を示す。

Table3 Results of failure compensation (1-3)故障

停止素子 (補償素子)	許容条件を満足する指向角度	
	位相差15[deg]	利得差1[dB]
補償なし	5.7	0
(1-2)	6.2	6.4
(1-4)	5.7	7.3
(1-6)	4.2	90.0

故障素子(1-3)と点対称な位置にある(1-6)を停止することで再び利得を完全一致させ

ることができる。停止する素子によって位相差の許容条件を満足する指向角度も異なる。利得差の許容条件と合わせて考えると, ビーム2の(1-2)素子を停止すると, 空間重畳可能範囲は最も大きい約 6.2[deg]となる。

7. まとめ

本報告では重畳型多値変調システムの必須技術である 2 ビームを空間上で重畳合成するアレイアンテナを提案した。その結果, 伝送特性上許容される重畳誤差以内で重畳合成可能であること, 重み付けによりサイドローブの低減が可能であり, このときの空間重畳可能範囲は約 8.5[deg]となることを明らかにした。

実運用を考慮した検討の結果, ステアリング角 10[deg]においても空間重畳可能範囲は約 8.5[deg]であり, ステアリング時にも許容条件を満足できること, 各アンテナ素子の利得・位相設定誤差を利得 1[dB], 位相 10[deg]まで許容しても空間重畳可能範囲は約 5[deg]以上が可能であることを明らかにした。

さらに素子故障時の性能劣化を補償する方法を検討し, 空間重畳可能範囲として約 6.2[deg]以上確保できることを明らかにした。

参考文献

- [1]M.Tanaka, New Satellite Communications System using Power Combined M-ary Modulation Technology, AIAA ICSSC2003, AIAA-2003-2288, 2003, April.
- [2]田中將義, 空間電力合成を用いた重畳型 16QAM 通信システムの伝送特性, シミュレーション, 第 24 巻, 1 号, p75-82, 2005.
- [3]M.Tanaka, New M-ary QAM Transmission Payload System, AIAA, ICSSC2005, I000249, 2005, Sept.
- [4]江口拓弥, 田中將義, 信学総大, B-1-47, 2006, Mar
- [5]M.Tanaka, &T.Eguchi, Spatially Superposed 64-QAM Communication System, AIAA, ICSSC2006, AIAA-2006-5347, 2006, June.
- [6]田中將義, 江口拓弥, 信学サイエティ, B-3-3, 2006, Sept
- [7]江口拓弥, 田中將義, 信学サイエティ, B-1-152, 2006, Sept