

基于 QPSK 的智能天线固定多波束基带 DBF 算法

姜永权¹, 魏 月²

(1. 汕头大学电子工程系, 广东汕头 515063; 2. 中国空间技术研究院 515 研究所, 广东汕头 515041)

摘 要: 射频(RF)波束形成算法,难以直接采用数字信号处理(DSP)技术,实时完成数字波束形成(DBF)计算。对于相移键控(PSK)调制方式,本文认为 RF 波束形成算法可等效在基带实现。针对四相相移键控(QPSK)调制方式,本文提出了一种新的智能天线固定多波束基带 DBF 算法。与 RF 波束形成算法相比,提出的算法可实现同样的辐射方向图,但需要的计算量却大幅度地降低。基带 DBF 算法,使智能天线的实现更为简单、应用更为灵活、性能更为优良,对推动智能天线技术实用化发展具有重大意义。

关键词: 智能天线; 基带数字波束形成; 相移键控; QPSK

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 07-1114-04

The Baseband Digital Beamforming Algorithm for Smart Antenna Fixed Beams Based on QPSK

JIANG Yong-quan¹, WEI Yue²

(1. Dept. of Electronic Engineering, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China;

2. No. 515 Institute of CAST, Shantou, Guangdong 515041, China)

Abstract: Radio frequency (RF) beamforming algorithms are impractical to achieve digital beamforming (DBF) directly by digital signal processing (DSP) techniques in real time. For phase shift keying (PSK) modulation techniques, this paper considers that RF beamforming algorithms can be implemented equivalently in baseband. For quadrature phase shift keying (QPSK) modulation technique, a baseband DBF algorithm of smart antenna fixed beams is presented. Compared with RF beamforming algorithms, the presented algorithm can achieve the same radiated patterns, but it requires quite low computational cost. The baseband DBF algorithm can make smart antennas be realized easily, and flexibly, perform better, and play an important role in practical applications.

Key words: smart antennas; baseband digital beamforming; PSK; QPSK

1 引言

智能天线技术,因其能够明显改善无线通信系统的性能,近年来,国内外理论界和工程界都给予了高度重视。在码分多址(CDMA)蜂窝移动通信系统中,使用智能天线可降低多址干扰(MAI),从而进一步提高系统容量和频谱利用率。另外,在 CDMA、频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)制式的移动通信系统中,使用智能天线都可增加系统的接收灵敏度,增大天线的等效全向辐射功率(EIRP)值,并且多径传播等问题也相应得到解决^[1]。

智能天线实际上是一种多波束阵列天线,它同时可针对多个方向或多个用户,形成多个独立的天线方向图。波束形成算法,是智能天线的理论基础;有效形成射频多波束,是实现智能天线的关键。

目前,关于智能天线波束形成的理论算法,即关于阵列复加权矢量的控制算法,国内外学者已进行了大量的研究。这些

算法大致可以分为三类:(1)自适应算法。主要有 LMS、RLS 算法等^[2];(2)基于来波方向(DOA)的算法。有 Capon^[3]、MUSIC、ESPRIT 算法等^[4];(3)固定多波束算法。自适应算法,通过对接收到的信号与期望信号进行比较,获得阵列复加权矢量的最优控制算法,算法通常周期性地需要训练序列,浪费了一定的信道资源。由于无线信道的复杂性,特别是多径效应的存在,在移动通信系统中应用第二类算法的难度很大。固定多波束算法,阵列复加权矢量的计算最为简单,且鲁棒性好,但算法本身不具有自适应能力。近年来,采用智能天线阵列的联合空时信号处理方面的研究也较为活跃,相对于纯空间波束形成算法,可达到更高的性能^[5,6]。

关于智能天线射频多波束的实现方法,大致也可分为三类:(1)模拟幅相加权网法。这种智能天线的模拟实现方法,硬件系统复杂且应用缺乏灵活性。(2)多抽头延迟线法^[7,8]。该方法通过调整抽头系数,达到控制波束形状的目的,其实也是一种智能天线的模拟实现方法。(3)中频数字波束形成方法。

随着软件无线电 (SR) 概念的出现,一些学者提出了基于中频信号处理的数字波束形成方法^[9],这种方法在中频实时完成波束形成的数字化计算是可能的,但对数字信号处理 (DSP) 芯片的运算速度要求很高,通常需多个 DSP 芯片并行处理才能实现。

适用于 PSK 调制方式,本文提出了一种基带数字波束形成算法。该算法波束形成的实质运算虽然是对相干解调后的基带信号进行处理的,但却能够同时形成多个天线辐射方向图,系统获得的是天线方向图增益,而非天线分集增益。算法符合天线互易原理,对收发方向图都是适用的。基带 DBF 算法显著地降低了对 DSP 芯片运算速度的要求,使智能天线的实现更为容易。

2 智能天线射频波束形成算法简介

2.1 接收方向图射频波束形成算法

对应第 m 个接收方向图, N 单元智能天线阵列加权合成输出 RF 信号为:

$$y_m(t) = \sum_{i=0}^{N-1} w_{mi} x_i(t) = \mathbf{W}_m^T \mathbf{X}(t) \quad (1)$$

式中 w_{mi} 为第 i 阵元复加权系数, \mathbf{W}_m 为 RF 复加权矢量, $x_i(t)$ 为第 i 阵元接收的射频信号, $\mathbf{X}(t)$ 为天线阵列接收的射频信号向量, T 表示转置。式 (1) 算法的等效天线方向图为:

$$f(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} w_{mi} e^{j i u} \quad (2)$$

对于均匀线阵, $u = 2\pi d \sin \theta$, d 为相邻天线单元间的距离, θ 为射频波长, θ 为来波方向与线阵法线的夹角。

2.2 发射方向图射频波束形成算法

对应第 m 个发射方向图,某一用户在第 i 阵元天线的激励射频信号为:

$$r_{mi}(t) = v_{mi} r(t) \quad (3)$$

式中 v_{mi} 为射频复加权系数, $r(t)$ 为某一用户射频输出信号。式 (3) 算法的等效天线方向图为

$$f(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} v_{mi} e^{j i u} \quad (4)$$

为使收发具有相同的方向图,可令 $v_{mi} = w_{mi}$ 。

2.3 固定多波束复加权矢量算法

自适应算法,通过对接收到的信号与期望信号比较,获得 \mathbf{W}_m 的最优控制算法,第二类算法需对主要的 DOA 进行估计,这两类算法对应的天线方向图,随信号和干扰而变化,基本没有固定的形状。固定多波束算法 \mathbf{W}_m 的计算最为简单,且鲁棒性好。一般的固定多波束算法,对应主波束中心指向 θ_m 的第 m 个方向图,阵元权系数矢量 \mathbf{W}_m 是用来抵消 θ_m 方向在各阵元间形成的射频信号相位差,使加权后的各阵元射频信号在该方向上达到等相位。从相控阵天线的角度看,这种智能天线,相当于多个均匀阵列同时在工作。为了达到均匀线阵的输出效果,对应主波束中心指向 θ_m 的第 m 个方向图,令对应的权系数为:

$$w_{mi} = v_{mi} = e^{-j i 2\pi d \sin \theta_m} = e^{j b_{mi}} \quad (5)$$

式中 $b_{mi} = -i 2\pi d \sin \theta_m$, 此时天线方向图的最大值 $f(\theta_m) = N$, 半功率主瓣宽度约为 $0.886 \frac{1}{Nd}$ (弧度), 最大旁瓣电平约为 -13.5 dB。

3 基于 QPSK 的智能天线固定多波束基带 DBF 算法

通常情况下,只有在射频完成式 (1)、(3) 算法,才能形成多个独立的天线辐射方向图。移动通信系统的射频频率一般在 $800 \sim 900$ MHz 或 $1800 \sim 2000$ MHz 左右,遗憾的是,这样高的工作频率,在目前的技术条件下,用 DSP 方法完成算法实现是不现实的。用模拟方法实现,系统复杂、成本高且灵活性差。

根据阵列天线理论,阵列方向图是由阵列方向控制矢量决定的。对于均匀阵列,阵列方向图是由阵元间 RF 信号相位关系决定的。对于 PSK 调制方式,由于基带信息嵌入到射频载波相位中,对阵元间基带信号进行适当处理,能够有效控制阵元间射频信号的相位关系,因此可将式 (1)、(3) 算法转化到基带完成。下面以 QPSK 调制方式为例,分别讨论发射方向图、接收方向图的基带 DBF 算法。

3.1 发射方向图的基带 DBF 算法

设某一用户的 QPSK 调制信号为:

$$r(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sum_n g(t - nT) \cos[\omega_0 t + \phi(n)] \\ = I(t) \cos \omega_c t - Q(t) \sin \omega_c t \quad (6)$$

其中:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sum_n g(t - nT) \cos \phi(n) \quad (7)$$

$$Q(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sum_n g(t - nT) \sin \phi(n) \quad (8)$$

式中 T 为基带符号周期, E 为信号在一个符号周期内的能量, ω_c 为射频载波信号的角频率。 $g(t)$ 为矩形时间窗函数,定义如下:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\phi(n)$ 为射频载波在 $nT < t < (n+1)T$ 期间的相位值,由 2 比特基带二进制码选取 4 个取值之一。当 2bit 基带二进制码 11、01、00、10 对应的 $\phi(n)$ 值分别为 $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{3\pi}{4}$ 、 $\frac{5\pi}{4}$ 、 $\frac{7\pi}{4}$, 且用二值高电平表示逻辑 1, 用二值低电平表示逻辑 0, 则 $I(t)$ 、 $Q(t)$ 为双极性二值电平信号,如图 1 所示,很容易由基带信号经串并转换、双极性电平产生器得到。

对应 QPSK 调制方式下固定多波束算法,式 (3) 可改写为:

$$r_{mi}(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \sum_n g(t - nT) \cos[\omega_c t + \phi(n) + b_{mi}]$$

经整理得:

$$r_{mi}(t) = \mathcal{I}_{mi}(t) \cos \omega_c t - \mathcal{Q}_{mi}(t) \sin \omega_c t \quad (9)$$

其中:

$$\mathcal{I}_{mi}(t) = I(t) \cos b_{mi} - Q(t) \sin b_{mi} \quad (10)$$

$$Q_{mi}(t) = I(t) \sin b_{mi} + Q(t) \cos b_{mi} \quad (11)$$

式(9)实现了基带信号 $I_{mi}(t)$ 、 $Q_{mi}(t)$ 与射频正交载波线性分离,且射频复加权系数的作用成功地转化到基带信号处理中去,表明射频波束形成算法可转化到基带完成。式(9)、(10)、(11)给出了式(3)的基带等效算法,即基带 DBF 算法。图 1 给出了对应第 m 个发射方向图,某一用户通过基带 DBF 算法,输出到第 i 阵元天线射频激励信号的产生过程方框图。

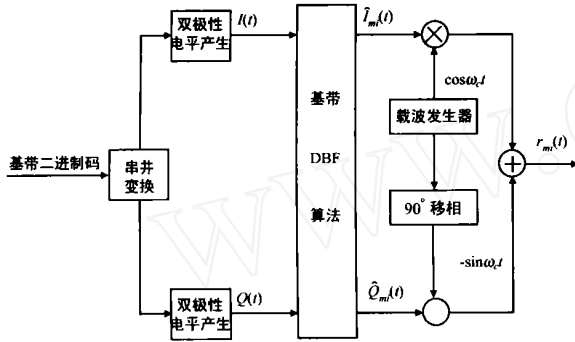


图 1 对应第 m 个发射方向图,某一用户通过基带 DBF 算法,输出到第 i 阵元天线射频激励信号的产生过程方框图

3.2 接收方向图的基带 DBF 算法

在未计噪声和干扰的情况下,第 i 阵元天线接收到的某一用户 QPSK 射频信号为:

$$x_i(t) = \sum_n g(t - nT) \cos[ct + (n) + u_i]$$

式中 u_i 为阵列方向控制矢量的第 i 元素相位。如图 2 所示,经相干解调、低通滤波(LPF),输出两路基带信号为:

$$\begin{aligned} I_i(t) &= \sum_n g(t - nT) \cos[(n) + u_i] \\ Q_i(t) &= \sum_n g(t - nT) \sin[(n) + u_i] \end{aligned} \quad (12)$$

QPSK 调制方式下固定多波束算法,对应第 m 个接收方向图,第 i 阵元天线接收到的某一用户射频信号加权输出为:

$$y_{mi}(t) = w_{mi}x_i(t) = \sum_n g(t - nT) \cos[ct + (n) + u_i + b_{mi}]$$

此信号若经相干解调、低通滤波(LPF),输出两路基带信号为:

$$\begin{aligned} I_{mi}(t) &= \sum_n g(t - nT) \cos[(n) + u_i + b_{mi}] \\ Q_{mi}(t) &= \sum_n g(t - nT) \sin[(n) + u_i + b_{mi}] \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)即为希望得到的第 i 阵元天线接收射频信号加权后对应的基带信号。与射频波束形成算法不同,基带 DBF 算法要求波束合成运算不能在射频频段中进行,而应在基带完成波束形成的实质运算。首先对各阵元天线接收到的射频信号进行相干解调、低通滤波,然后再对输出的基带信号(由式(12)表示)进行处理。为了达到射频波束形成算法的同样效果,要求式(13)的结果能够由式(12)的基带信号经适当算法精确得到。符合上述要求,本文给出了如下接收方向图的基带 DBF 算法:

$$I_{mi}(t) = I_i(t) \cos b_{mi} - Q_i(t) \sin b_{mi} \quad (14)$$

$$Q_{mi}(t) = I_i(t) \sin b_{mi} + Q_i(t) \cos b_{mi} \quad (15)$$

与式(10)、(11)比较,我们发现,收发基带 DBF 算法是一致的,这说明提出的基带 DBF 算法符合天线收发互易原理。

式(14)、(15)给出了第 i 阵元天线接收信号的基带加权算法。对应第 m 个接收方向图,阵列天线合成接收信号的基带加权算法由下式给出:

$$I_m(t) = \sum_{i=0}^{N-1} I_{mi}(t), Q_m(t) = \sum_{i=0}^{N-1} Q_{mi}(t) \quad (16)$$

式(14)~(16)综合给出了式(1)的基带等效算法,即接收方向图的基带 DBF 算法。图 2 给出了对应第 m 个接收方向图,通过基带 DBF 算法,产生基带输出信号过程的方框图。

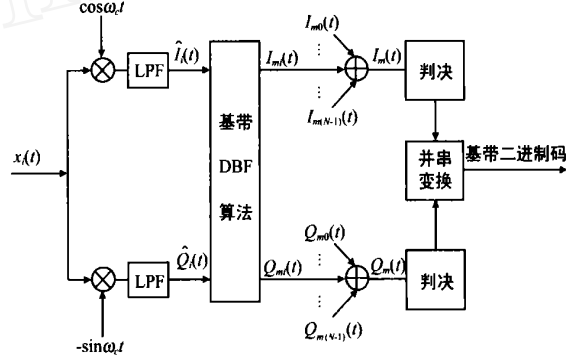


图 2 对应第 m 个接收方向图,通过基带 DBF 算法,产生基带输出信号过程的方框图

4 计算举例与分析讨论

作为计算举例,我们假定:智能天线采用均匀线阵实现,阵元数目 $N=8$,相邻阵元空间距离 $d = \frac{\lambda}{2}$,五个独立的方向图主波束分别指向 $\theta_m = -40^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 。按基带 DBF 算法,图 3 计算给出了 5 个独立的阵列方向图。表 1 给出了主波束指向 $\theta_m = 20^\circ$ 时,射频复加权系数、基带加权系数的计算结果。

表 1 射频复加权系数、基带加权系数的计算结果(主波束指向 $\theta_m = 20^\circ$)

波束	阵元								
	0	1	2	3	4	5	6	7	
$m=20$	射频复加权系数	1	$e^{-j1.075}$	$e^{-j2.149}$	$e^{j3.000}$	$e^{j1.985}$	$e^{j0.911}$	$e^{-j0.164}$	$e^{-j1.239}$
	基带加 $\cos b_{mi}$	1	0.476	-0.546	-0.996	-0.402	0.613	0.986	0.326
	权系数 $\sin b_{mi}$	0	-0.879	-0.857	0.081	0.915	0.730	-0.163	-0.945

以上给出的只是理论上的计算结果,在实际阵列天线中,阵元间不可避免地存在着互耦作用。互耦的影响是一个非常复杂的问题,它与阵元天线的类型、阵元空间分布等因素有关。当互耦作用较强时,将严重影响阵列天线的性能,使旁瓣电平升高、主瓣变形,甚至产生主瓣漂移。不过,通过选择适当的阵元天线类型、阵元间距,实验表明^[10],互耦的影响是可以降到较低水平的。

本文主要给出了固定多波束的基带 DBF 算法,与射频或中频 DBF 算法相比,基带 DBF 算法显著地降低了对 DSP 芯片运算速度的要求。由于固定多波束算法本身的限制,基带 DBF

算法也不具有自适应性,但工程上可采用波束切换技术实现用户跟踪。鉴于本文主题和篇幅的限制,自适应基带 DBF 算法,将另行讨论。

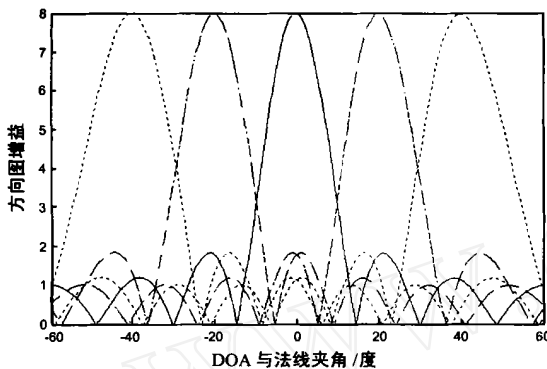


图 3 基带 DBF 算法的等效阵列方向图(五个独立的方向图主波束分别指向 $m = -40^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$)

5 结论

本文以标准 QPSK 调制方式为例,给出了收发方向图的基带 DBF 算法。对于其它 PSK 调制方式,如两相相移键控(BPSK)、交错四相相移键控(OQPSK)、 $\frac{1}{4}$ 差分四相相移键控($\frac{1}{4}$ DQPSK)等,可按同样思路得到各自的基带 DBF 算法。BPSK 的基带 DBF 算法与标准 QPSK 的一个并行支路基带 DBF 算法相当。OQPSK 与 QPSK 相比,只是在调制端 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 错开了半个符号周期,以限制最大相移量不超过 $\pm\frac{\pi}{2}$,因此其基带 DBF 算法与 QPSK 基带 DBF 算法是一样的。 $\frac{1}{4}$ DQPSK 利用了相位差分编码原理,使得每符号位都有相位变化,且最大相移量限制在 $\pm\frac{3\pi}{4}$ 以内, $\frac{1}{4}$ DQPSK 相干解调时只要求接收机载波与发射机载波同频,允许两者间有固定相位差或相位差较基带信号缓慢变化,因此在工程上得到了广泛应用,上述基带 DBF 算法,同样适用于 $\frac{1}{4}$ DQPSK 调制方式,不过要在“判决”前进行相位差分解码。

总之,对于 PSK 调制方式,在基带完成 DBF 计算达到在射频完成的同样效果,不仅是可能的,而且是现实的。本文以固定多波束智能天线为例,给出了基带 DBF 的具体算法。与射频波束形成算法相比,基带 DBF 算法大大降低了智能天线的工程实现难度,对推动智能天线技术向实用化发展具有重大意义。

参考文献:

- [1] J H Winters. Smart antennas for wireless systems [J]. IEEE Pers Commun, 1998, 5(1): 23 - 27.
- [2] R T Compton Jr. Adaptive antennas concepts and performance [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1988.
- [3] Capon J, High resolution frequency wave number spectrum analysis [A]. Proc IEEE [C], 1969, 1408 - 1418.
- [4] 金梁,殷勤业. 时空 DOA 矩阵方法的分析与推广 [J]. 电子学报, 2001, 29(3): 300 - 303.
- [5] S Choi, D Shim. A novel adaptive beamforming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment [J]. IEEE Trans Veh Technol, 2000, 49(5): 1793 - 1806.
- [6] 杨煜,冯正和. 强干扰情况下用于 CDMA 系统的时空域联合处理 [J]. 电子学报, 2000, 28(6): 55 - 59.
- [7] L C Godara, M R S Jahromi. Limitations and capabilities of frequency domain broadband constrained beamforming schemes [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1999, 47: 2386 - 2395.
- [8] 赵瑞锋,谈振辉,蒋海林. 无线系统中的智能天线 [J]. 电子学报, 2000, 28(12): 77 - 82.
- [9] J Razavilar, F Rashid-Farrokhi, K J Ray Liu. Software radio architecture with smart antennas: A tutorial on algorithms and complexity [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(4): 662 - 676.
- [10] JIANG Yong-quan, LU Ming-ru. Realization of several scanning shaped beams by phased only array antenna [A]. SCRC 95 [C]. 1995, 398 - 401.

作者简介:



姜永权 男,1965 年 6 月出生于辽宁,1988、1991 年分别于大连理工大学、中国空间技术研究院获学士、硕士学位,现为汕头大学副教授,主要从事数字信号处理、移动通信、智能天线的教学及科研工作。



魏月 女,1967 年 1 月出生于成都,1989 年毕业于西安工业学院获学士学位,现为中国空间技术研究院高级工程师,主要从事天线设计开发工作。