

一种新颖的四天线时空调制通信定位综合化系统^①

宋茂忠^②

(南京航空航天大学电子工程系 南京 210016)

摘要 针对通信定位综合一体化的趋势和未来移动通信发展的需要,提出了一种新颖的四天线时空调制技术,设计了一种差分编码非正交四相时空调制通信定位综合化系统。该系统除具有PSK的通信能力外,还能测定用户方位,具有抗多径的潜力。最后给出了信号的调制编码、接收机的解调与载波恢复、方位角估计等关键问题的解决方案,分析了在高斯信道下的差分解调和相干解调的误码率和方位角的测量精度。

关键词 调制技术,导航,移动通信,智能天线,测向

0 引言

通信定位的综合化是现代电子系统综合一体化的重要组成部分,也是学科发展的必然趋势。但目前通信定位综合都是以伪码测距为基础的扩频通信系统,如全球定位系统(GPS)、全球导航卫星系统(GNSS-2)、双星定位系统和联合战术分布系统(JTIDS)等。它们占用频带宽,传送信息速率不高。最近,针对移动通信网也提出了E911定位服务问题,给通信定位综合化研究提出了更高要求。在现有移动通信系统中,利用多个基站,通过测量的到达时间(TOA)、到达角(AOA)及差分到达时间(DTOA),可以实现用户定位技术,但定位精度受多径、非视线传播的限制,定位对通信系统也产生许多干扰。因为现有的移动通信信号设计,特别是数字调制信号设计没有兼顾定位问题。

回顾调制技术的发展,从模拟的调制到连续相位数字调制,从独立设计到与编码组合的格状码调制,主要追求的是发射功率或频率资源的利用率,都属时域调制。导航中的甚高频全向信标、塔康、仪表着陆系统采用多天线模拟调制,能提供空间信息,没有数字通信能力。抗多径衰落的多天线发射分集和最近提出的功率频率抗多径都有效的时空编码,在信号调制上没有什么新意,不容易提取空间信息。因此同时兼顾通信定位两方面要求的数字调

制技术还是一个空白。为此,本文针对未来移动通信系统应具备定位能力的要求,提出了一种新颖的四天线数字时空调制技术,解决了利用时空调制组建一个通信定位系统的关键问题。下面就从时空调制原理入手,论述时空调制信号的发射,差分编码、相干解调与载波提取、方位角估计等解决方案,分析误码率和测向精度。

1 四天线时空调制信号的发射原理

为了在发射信号中包含有空间方位信息,考虑图1所示的四天线发射系统。设待传送信息为 q_m ,编码后输出两路二进制信息 b_m 和 c_m , b_m 和 c_m 取 ± 1 经PSK调制放大后,形成 $s_1(t) = b_m = \cos\omega t$ 和 $s_2(t) = c_m \sin\omega t$,直接激励天线N和E,同时把 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 反相后再激励天线W和S。N、E、S和W是4副同样的线天线,如半波振子天线,它们的对角线间距为 D 。根据天线阵理论,对 $s_1(t)$ 信号,N和S构成二元反向激励阵,见图1。

$$x(\theta) = \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin\theta\right) \quad (1)$$

对 $s_2(t)$ 信号,E和W构成二元反向激励阵,方向图为:

$$y(\theta) = \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \cos\theta\right) \quad (2)$$

合成后在方位角 θ 方向产生的远区场为:

$$r(t) = b_m x(\theta) \cos(\omega t + \phi) + c_m y(\theta) \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

$$r(t) = A(\theta) \cos[\omega t + \Psi(\theta) + \phi] \quad (4)$$

^① 国家自然科学基金(69972018)及航空科学基金(97E52033)资助项目。
^② 男,1962年生,硕士,副教授,研究方向:无线通信与无线定位,联系人。
 (收稿日期 2000-05-18,修订日期 2000-07-04)

$$\text{式中 } A(\theta) = \sqrt{x^2(\theta) + y^2(\theta)} \quad (5)$$

$$\Psi(\theta) = \arctg \frac{b_m x(\theta)}{c_m y(\theta)} \quad (6)$$

上式中, ω 为发射信号载波角频率, 对应波长为 λ 。 ϕ 是 0 点到 R 点距离对应的相位滞后量。 $A(\theta)$ 为接收信号的振幅, 对于特定的方位 θ , $A(\theta)$ 为常数, 所以是恒定包络调制。 $\Psi(\theta)$ 是接收信号可变相位, 它随 b_m 和 c_m 在图 2 中的 4 个相位状态变化, 类似于 QPSK 信号调制, 但矢量并不正交, 其夹角与方位角有关。分析上述调制过程, 除用 PSK 时域调制

外, 还利用 4 根天线的空间变化来控制信号相位, 所以本文称它为时空调制, 对应的信号为时空调制信号。时空调制信号的最大特点是信号空间中既含有通信信息, 又有方位信息, 可以同时实现通信和测向。在射频不额外占用信道, 容易与普通 TDMA 或 CDMA 多址系统兼容, 接收机可用单天线结构。适于通信定位综合化系统, 如空管二次雷达、塔康系统、未来移动通信的用户定位和智能天线的自学习等场合。

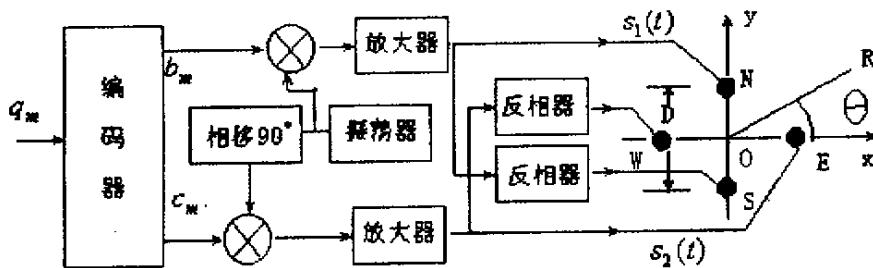


图 1 四天线时空调制发射原理图

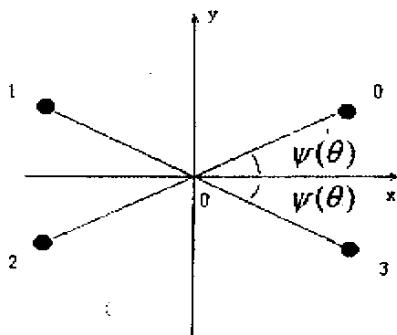


图 2 空间调相信号矢量图

0.2λ 时, $A(\theta)$ 几乎为 1, $\Psi(\theta) \approx \theta$ 。当 $D > 0.5\lambda$ 时, $A(\theta)$ 随 θ 起伏增大, $\Psi(\theta)$ 存在多值性, 方位信息就难以提取。图 3 就是当 $D = 0.5\lambda$ 时, $A(\theta)$ 和 $\Psi(\theta)$ 的计算结果。从图 3 看出 $A(\theta)$ 的寄生调制并不是非常严重, 对通信定位基本没有影响。 $\Psi(\theta)$ 虽然是波浪上升, 但仍有一一对应的关系, 用非线性变换容易解决。因此当 $D \leq 0.5\lambda$ 时, 四天线时空调制都具有良好的性质。基于(3)式通过计算机仿真或理论推导可以证明: 当方位角一定时, 时空调制信号的频谱与 QPSK 完全一样。

2 四相信号空间的差分编码

从图 2 看出, 当接收机位于 X 轴或 Y 轴延长线附近时, 4 个状态两两靠得很近, 误码性能恶化。为避免这种现象, 可把传信率下降一倍, 编码时某时的信号状态, 仅取与前一时刻信号矢量不在同一直线的其它两个状态。如已调信号第 $m-1$ 时刻为矢量 0, 在第 m 时刻输入 1 时, 转换到矢量 1 状态, 输入 -1 时, 转到矢量 3 状态。已调信号相位的马尔科夫过程为:

$$\begin{aligned} \Psi(m, \theta) = & -\Psi(m-1, \theta) + 0.5\pi \\ & + 0.5a_m\pi(-1)^{m-1} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $a_m = \pm 1$, 是输入信息 q_m 的差分码, $a_m = a_{m-1}$

图 3 $D = 0.5\lambda$ 时, $A(\theta)$ 和 $\Psi(\theta)$ 的计算结果

对不同的天线间距 D 计算结果表明, 若 $D \leq$

$\oplus q_m$ 调制由 a_m 和前一时刻相位初值形成 b_m 和 c_m 来实现。这种利用 4 个相位状态仅传送一路二进制信息的调制，本文称之为二进制四相时空调制，简称 STM(2-4)。这种二进制四相差分编码有 3 个优点：(1) 两比特差分解调后判决样本空间仅为 0 和 π 两态，误码性能与方位无关；(2) 一比特差分解调时可提取方位信息；(3) 便于载波提取和相干解调。下面一一进行详细分析。

3 通信信息的两比特差分解调

对上述的 STM(2-4) 信号，若用两比特差分解调，可得如下观察样本：

$$y(mT_b) = \int_{mT_b}^{(m+1)T_b} [r(t) + n(t)] \mathbb{I} r(t - 2T_b)$$

q_m	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1
$a_m = a_{m-1} \oplus q_m$	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
已调信号状态	0	3	0	3	2	3	2	3	2	1	0	3	0	1	0	3	2	3	2	1	2	1	2
两比特差分相差	0	0	π	0	0	0	0	0	π	π	π	0	π	0	π	π	0	0	π	0	0	0	0
$\cos(\Delta\Psi)$	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	

由(11)式或上面的调制解调过程可得 $\cos(\Delta\Psi) = q_m$ 。

当信源 q_m 0、1 等概时，两比特差分的误码率为：

$$P_e = P\{ [A + n_c(t_1)] \mathbb{I} A + n_c(t_2)] + n_c(t_1)n_s(t_2) < 0 \} \quad (12)$$

(12)式的概率空间与差分相干 DPSK 判决相同^[6]，利用文献[6]的结果可以导出 STM(2-4)的误码率：

$$P_e = 0.5 \exp(-E_b/N_0) \quad (13)$$

$E_b = 0.5A^2T_b$ 为接收到的比特能量， N_0 为接收机的高斯噪声功率谱密度。

4 方位角的一比特差分估计

将(10)式差分相关间隔 $2T_b$ 改为 T_b ，得一比特观察样本 $y(mT_b)$ ，由(10)式和(6)式可导出方位角估计量：

$$\hat{\theta} = f^{-1}(0.5 \arccos \frac{y(mT_b)}{E_b}) \quad (14)$$

(14)式中 $f^{-1}(x)$ 表示(6)式从 Ψ 到 θ 的反函数，变化规律如图 3 所示。为分析测角精度，考虑 θ 在第一象限、 $\Psi \approx \theta$ 、相邻比特间隔高斯噪声统计独立的简单情况，由(10)式可导出(14)式是方位角的无偏估计，估计量方差为：

$$+ n(t - 2T_b) \mathbb{I} t \quad (8)$$

式中 T_b 为比特间隔，取 $\omega T_b = 2k\pi$ ， $n(t)$ 为窄带高斯噪声， $n(t)$ 可表示成

$$n(t) = n_c(t) \cos[\omega t + \Psi(m, \theta)] - n_s(t) \sin[\omega t + \Psi(m, \theta)] \quad (9)$$

$$\text{则 } y(mT_b) = 0.5T_b \cos(\Delta\Psi) \{ A + n_c(t_1) \mathbb{I} A + n_c(t_2) \} + n_s(t_1)n_s(t_2) \quad (10)$$

$$\Delta\Psi = \Psi(m, \theta) - \Psi(m-2, \theta) = 0.5\pi(a_m + a_{m-1}) \quad (11)$$

这里 $A = A(\theta)$ ， t_1 、 t_2 表示随机过程的两个不同时刻。(11)式表示两比特间隔的相位差，在模 2π 条件下成立。调制解调的详细过程如下(这里 0 码与公式中 -1 码等价)：

$$\sigma_\theta^2 = \operatorname{ctg}^2(\Delta\Psi) \left(\frac{N_0 B_n}{4C} + \frac{N_0^2 B_n^2}{8C^2} \right) \quad (15)$$

这时 $\Delta\Psi = 2\Psi(\theta)$ ， B_n 是接收机的等效噪声带宽， C 是接收机的接收功率。若对某移动通信环境，接收机接收功率 $C = -100 \text{ dBm} \sim -80 \text{ dBm}$ ， N_0 取 -174 dBm ， B_n 取 100 kHz ，方位角估计方差与接收功率及方位角的关系如图 4 和图 5 所示。从公式(15)和图 4 可以发现，方位角的估计均方差与接收信号功率成反比，与估计器的噪声功率成正比。图 5 表明方位角测

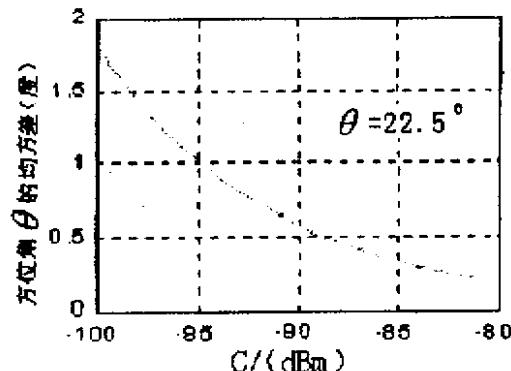


图 4 方位角估计均方差与接收信号功率的关系

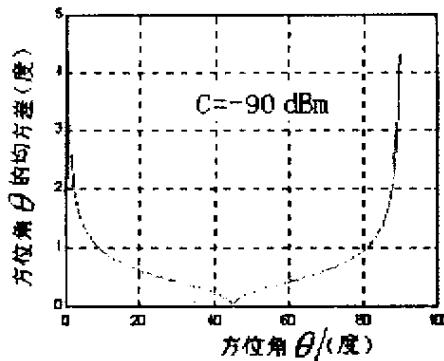


图 5 方位角估计均方差与方位角的关系

量精度与接收机所在方位有关,当接收机位于两轴的角平分线时,时空调制四相信号正交,一比特差分观测值为0,方差也为0,但方位角估计还是有意义的;当接收机位于X轴或Y轴上时,时空调制信号状态空间两两重合,状态糊模,因此方差恶化。

若STM(2-4)用于单基站测角-测距定位系统,接收机位于 $\theta=22.5^\circ$ 方位,离基站距离 $R\leq 5\text{km}$,接收信号功率为 $C=-90\text{dBm}$,那么测角均方差 $\sigma_\theta\leq 1^\circ$,位置线误差 $\Delta R=R\sigma_\theta\leq 87.3\text{m}$ 。如果测距误差均方差也能达88m,则定位误差均方差 $\sigma_n\leq 124\text{m}$,即在67%的概率下,定位误差小于124m。

5 STM(2-4)信号的载波提取与相干解调

从上面编码规则可知:相邻比特间隔两个STM(2-4)信号矢量不在一条直线上,并关于X轴或Y轴对称分布,它们的矢量和或矢量差必在轴线上,所以一比特差分信号之和或之差为非等幅正交四相信号,可用QPSK载波提取环加差分网络实现,QPSK载波提取中存在 $0, 0.5\pi, \pi, 1.5\pi$ 的相位糊模,只有用发射独特码解决。相干接收机框图如图6所示。

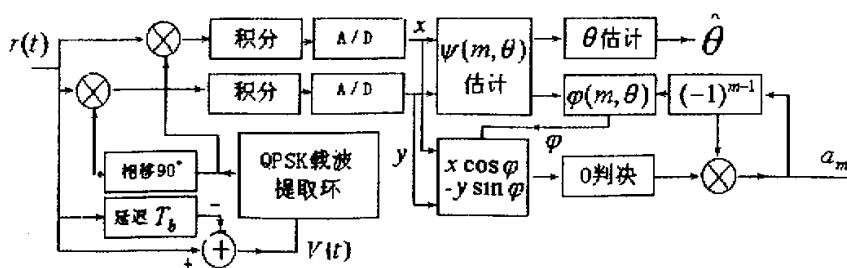


图 6 STM(2-4)的相干接收机框图

图6主要由载波提取、正交相关、方位角估计和判决译码4部分组成。在相干载波提取后, $\psi(m, \theta)$ 就可以从STM(2-4)信号中的两路正交幅度 x 和 y 求出,并用(6)式或图3的非线性关系估计方位角。这一部分在图6中用 $\psi(m, \theta)$ 估计和 θ 估计表示。二进制信息 a_m 的接收有两种方法(1)首先从接收信号中用四相判决的方法解调出 b_m 和 c_m ,再由差分编码规则译出 a_m 。这样误差性能比较差,并与方位角有关,当方位角靠近轴线时,信号空间距离太小,误码增加。(2)直接判决二进制 a_m 。直接判 a_m 的思想是若 $m-1$ 时刻信号状态已经正确判决,根据编码规则,在 m 时刻,当 $a_m=1$ 时理论上将转换到哪个状态是已知的。设这个状态的相位为 $\varphi(m, \theta)$,简写为 φ ,那么可把坐标轴旋转 φ 角,得到新坐标系 $x'y'$ 。 y' 轴为判决线, $x' = x \cos \varphi - y \sin \varphi$ 大于0,判 $a_m=1$,否则为0。另外,由于编码中采用了 $(-1)^{m-1}$ 交替倒相项,接收机只有利用独特码来同步。图中 $(-1)^{m-1}$ 表示这个同步器, $\varphi(m, \theta)$ 表

示利用 $m-1$ 时刻信号状态 $\psi(m-1, \theta)$ 和 $(-1)^{m-1}$ 由(7)式估计 φ 的过程。因为坐标轴旋转是线性变换,其雅可比行列式为1,不影响误码率的概率积分,所以如果不考虑条件检测的误码扩散,图6相干接收的误码率与相干PSK解调一样:

$$P_e = 0.5 \operatorname{erfc}(-E_b/N_0) \quad (16)$$

$\operatorname{erfc}(x)$ 为互补误差函数。(16)式相干解调的误码性能略优于(13)式的两比特差分解调。

图6框图的实现应首先考虑用软件无线电方法。对传信率在几百kb/s以下的系统,可以用数字中频技术,在中频A/D后直接送数字信号处理单元,全部由软件实现载波提取、信息解调和方位角估计。如传信率达几Mb/s或更高,只有按图6所示的在相关器后用软件实现。

6 结论

从上面的分析可以发现:二进制四相时空调制信号STM(2-4)在传送信息率、占用带宽以及接收机

的误码性能上都与 DPSK 一样 ,便于的差分解调和相干接收 ,并且 STM(2-4)具有定向能力 ,这是任何单天线收发数字通信系统都无法比拟的。利用测向可以实现两基准站的测角-测角定位、单基站的测角-测距定位、与差分到达时间组合定位等 ,也可以用于单一测向或目标自动跟踪系统。与多天线发射分集和时空编码比较 ,都具有抗多径能力 时空调制技术在射频信道复用上还有明显优势。如果象时空编码一样采用多天线接收 ,功率利用率有望改善。另外 时空调制把一维的基本时域调制技术推广到了时间空间二维情况 ,是调制理论的发展 智能天线的补充 ,与智能天线系统组合可达到信道自学习、自动定向、抗多径和抗多用户干扰等目的^[7]。

参考文献 :

- [1] Caffery J J , Stüber G L. *IEEE Com. Mag.* , 1998 , 36(4): 30
- [2] Reed J H , Krizman K J , Woerner B D , et al. *IEEE Com. Mag.* , 1998 , 36(4): 30
- [3] Kayton M , Fried W R. *Avionics navigation system*. Second edition , John Wiley & Sons , INC. , 1997
- [4] Alamouti S M. *IEEE J-SAC* , 1998 , 16(8): 1451
- [5] Tarokh V , Seshadri N , Calderbank A R. *IEEE T-IT* , 1998 , 44(2): 744
- [6] 王士林 陆存乐 龚初光等.现代数字调制技术.北京 :人民邮电出版社 , 1987
- [7] Tsoulos G V. *Electronics & Communication Engineering Journal* , 1999 , (4): 84

A New System Integrated of Communication and Radiolocation with Four Antennas Space-time Modulation

Song Maozhong

(Department of Electronic Engineering , Nanjing University of Aeronautics and Astronautics , Nanjing 210016)

Abstract

To meet the challenge of future mobile communication and integrated communication and radiolocation systems , a new space-time modulation technology with four antennas is proposed. With the modulation , a new integrated system is designed , which can find direction and carry with messages similar to PSK through differential coding non-quadrature four phases , and has a potential to mitigate multipath. The solutions of modulating signal , coding signal space , recovering synchronizer carrier frequency , demodulating coherently message and estimating azimuth are given. The performance of bit error rate and the accuracy of direction-finding in presence of Gaussian noise are investigated.

Key words : Modulation , Navigation , Mobile communication , Smart antenna , Direction-finding

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>