

阵列天线在超宽带通信系统中的应用研究

王 锋,牛忠霞,王映民,饶育萍

(信息工程大学信息工程学院,河南郑州 450002)

摘 要: 本文介绍了时跳-脉冲位置调制 (TH-PPM) 超宽带信号形式的信号结构,并分析了高斯脉冲波形及其自相关函数的时域特性. 给出了一个阵列天线模型,定义并仿真计算了阵列天线的峰值幅度方向图,结果表明,阵元数目越多,阵列波束宽度越窄;同时,提出了二分搜索波束形成算法并进行了仿真,仿真结果表明,该波束形成算法收敛速度快,收敛步数在 1~15 步之间,能实时调整阵列的主波束方向对准来波的方位,得到信号的最佳接收.

关键词: 波束形成算法; 阵列天线; 方向图; 自相关函数

中图分类号: TN91

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2005) 06-1081-03

Study on the Application of Antenna Array in Ultrawide-Band Communication Systems

WANG Feng, NIU Zhong-xia, WANG Ying-min, RAO Yu-ping

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002)

Abstract: This paper describes the configuration of a typical time-hopping, pulse position modulated (TH-PPM) signal for ultrawide-band (UWB) systems and the time-domain properties of the Gaussian pulse and its autocorrelation function are derived. An antenna array model for UWB communication systems is introduced and the peak-amplitude pattern is defined and simulated. Simulative results indicate that the beam width grows narrower when the array number gets large. It also provides a rapid bi-searching beamforming algorithm. Simulations show that the convergent steps of the algorithm are between one and fifteen. The algorithm could electronically steer the beam axis to the direction of the source signal and the optimum signal reception is achieved.

Key words: beamforming algorithm; antenna array; directivity pattern; autocorrelation function

1 引言

超宽带 (Ultrawide-Band) 技术是近年来人们研究的热点之一,在军事和民用中有着广泛的应用前景. 由于超宽带天线具有增益不高、方向性不强的特点,而且美国联邦通信委员会 (FCC) 还严格限制了超宽带系统的发射功率,而采用阵列天线技术是解决这个问题的有效途径. 本文从超宽带系统一种典型的信号形式和阵列天线模型出发,定义了阵列天线的峰值幅度方向图,并构造了二分搜索波束形成算法.

2 超宽带系统发射脉冲的信号模型

在超宽带 (UWB) 通信中,最常见的信号形式是时跳-脉冲位置调制 (TH-PPM) [1]. TH-PPM 信号是由一系列随机时移的窄脉冲构成的,在多用户情况下,第 k 个发射机的发射信号可写成:

$$s^{(k)}(t) = \sum_{j=1}^N p(t^{(k)} - jT_f - c_j^{(k)}T_c - d_{\lfloor j/N_s \rfloor}^{(k)}) \quad (1)$$

式 (1) 中, $t^{(k)}$ 是第 k 个发射机的发射时间, T_f 是脉冲重复周期,即帧长度, T_f 可以是脉冲宽度的几百到几千倍,脉冲序列

占空比很低. $p(t)$ 是脉冲波形函数, T_c 是时隙宽度, $\{c_j^{(k)}\}$ 是分配给第 k 个用户的跳时码序列,其作用是在每个脉冲序列的第 j 个脉冲加入 c_jT_c 的时移, $d_{\lfloor j/N_s \rfloor}^{(k)}$ 表示数据调制,数据位为 1 时脉冲就会有一个时移,数据位为 0,则脉冲没有附加的时移. N_s 是系统传输一个数据比特所发射的脉冲个数.

本文采用的脉冲波形时域表达式 [2] 如下式:

$$p(t) = \frac{E_0}{1 - \left(\frac{t}{T}\right)^2} \left[e^{-4\left(\frac{t}{T}\right)^2} - e^{-4\left(\frac{t-T}{T}\right)^2} \right], \quad 1 \leq t \leq 2T \quad (2)$$

E_0 是脉冲波形在 $t=0$ 时的峰值幅度, T 是脉冲宽度,是收缩因子,取不同值时波形形状不同,如图 1(a) 所示. $p(t)$ 的自相关函数 $r(t)$ 可表示为:

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) p(\tau + t) d\tau \quad (3)$$

从图 1(a) 可以看出,脉冲波形是轴对称的,主瓣和副瓣的宽度是 t 的递减函数, $t=0$ 时,脉冲的副瓣消失, $p(t)$ 为高斯脉冲.

$p(t)$ 的自相关函数 $r(t)$ 如图 1(b) 所示,脉冲信号的能量 E 就是其自相关函数 $r(t)$ 在 $t=0$ 时的峰值 $E = r(0)$.

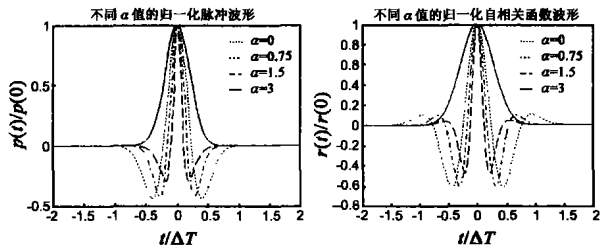


图 1 (a) α 取不同值时的脉冲波形; (b) α 取不同值时的脉冲自相关波形

3 超宽带通信的阵列天线模型

3.1 阵列天线模型

考虑一个用于接收的阵列天线,如图 2 所示. 假设天线阵列是一个等距线阵,由 $M = 2m + 1$ 个全向阵元组成,相邻阵元的间距是 d ,每个阵元后面使用一个滑动相关器 (Slide Correlator) 和可调节的延时电路 (Variable Time Delay) [3],用于接收信号的时域处理和延时控制.

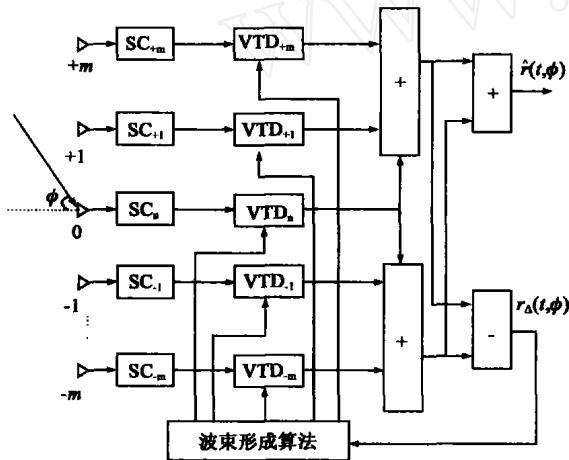


图 2 超宽带通信的阵列天线模型

阵列天线被分为两个子阵,各阵元接收到的信号与本地模板信号进行滑动相关运算 (在接收的时间窗内),然后再通过可变时延调整电路进行相应的延时,最后送到加法器中求和得到主信号,将两个子阵的和信号送到减法器中求其差,得到的差信号去控制可变时延调整电路,使得阵列系统的波束主轴调整到信号的方位,达到信号的最佳接收. 这就是天线阵列的工作原理.

3.2 阵列天线的方向图

如图 2 所示的阵列天线,采用式 (2) 给出的脉冲波形. 假设平面波入射角度为 ϕ ,即来波方向与线阵法线方向 (阵列的主波束方向) 的夹角,则第 i 个阵元接收到的信号为:

$$v_i(t, \phi) = p(t + i(\phi)) \quad (4)$$

式 (4) 中, $i(\phi)$ 是第 i 个阵元接收到的信号与中心阵元 0 接收到的信号的相对时延差:

$$i(\phi) = i \cdot d \cdot \sin \phi / c \quad (5)$$

式 (5) 中, c 为电磁波在空间中的传播速度, d 为相邻阵元间距.

阵元接收到的信号 $v_i(t, \phi)$ 经过滑动相关器 SC_i 的运算,得到相关函数:

$$r_i(t) = r(t + i(\phi)) \quad (6)$$

$r_i(t)$ 经过可变时延电路 VTD_i 进行相应的延时:

$$\wedge_i(\phi_0) = i \cdot d \cdot \sin \phi_0 / c \quad (7)$$

式 (7) 中, ϕ_0 对应于可变时延电路的延时等效于将阵列的主波束方向旋转的角度. 因此,可变时延电路 VTD_i 的输出信号为 $r(t + i(\phi) - \wedge_i(\phi_0))$, 天线阵列主信号输出为:

$$r(t, \phi) = \sum_{i=-m}^m r(t + i(\phi) - \wedge_i(\phi_0)) \quad (8)$$

在式 (8) 中,令 $\phi = \phi_0$,则 $i(\phi) = \wedge_i(\phi_0)$, 天线阵列产生最大的主信号输出:

$$r(t, \phi_0) = Mr(t) \quad (9)$$

对于超宽带系统的阵列天线,一般不采用功率方向性系数. 在这里,我们可以根据 $r(t, \phi)$ 的峰值幅度来定义阵列天线的阵列因子:

$$(\phi) = \frac{r(0, \phi)}{r(0, \phi_0)} = \frac{r(0, \phi)}{ME} \quad (10)$$

如图 3 所示,给出了几种不同情况下的阵列方向图.

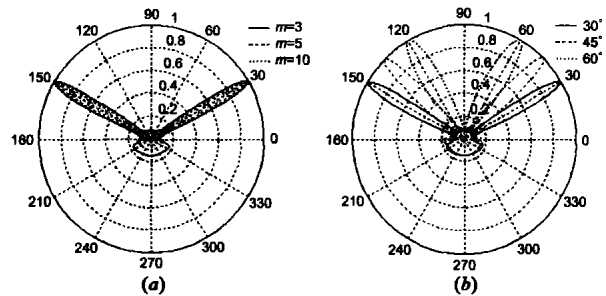


图 3 (a) 不同阵元数目 ($m=3, 5, 10$) 方向图
(b) 不同延时 ($\phi_0=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) 方向图

从图中可以看出,当阵元数目增加时,阵列波束的主瓣宽度变窄,副瓣变小.

4 天线阵列的波束形成算法

如图 2 所示,两个子阵列的差信号可以用下式表示:

$$r(t, \phi) = \sum_{i=0}^{+m} r(t + i(\phi) - \wedge_i(\phi_0)) - \sum_{i=-m}^0 r(t + i(\phi) - \wedge_i(\phi_0)) \quad (11)$$

图 4 给出了不同情况下 $r(t, \phi)$ 的图形. 从图 4 (a) 可以

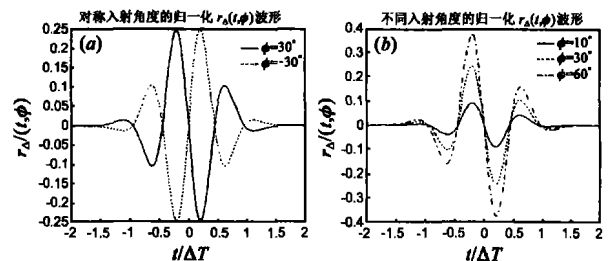


图 4 (a) 对称入射角度 $r_d(t, \phi)$ 的波形 ($\phi_0=0$)
(b) 不同入射角度 $r_d(t, \phi)$ 的波形 ($\phi_0=0$)

看出, $r(t, \phi)$ 是关于 t 和 ϕ 的奇函数, 即:

$$r(t, \phi) = -r(-t, \phi) = -r(t, -\phi) \quad (12)$$

而且, 由图 4(b) 可知, $r(t, \phi)$ 波形正、负峰值点连线的斜率与来波入射角 ϕ 成反比, 入射角 ϕ 越大, $r(t, \phi)$ 波形正、负峰值点连线的斜率越小。基于 $r(t, \phi)$ 波形的奇对称性和其正、负峰值点连线斜率的特点, 我们可以构造阵列天线的波束形成算法, 实时调整延时控制电路, 使阵列的主波束对准来波方向, 得到信号的最佳接收。由于阵列的对称关系, 只考虑在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 范围内搜索来波入射角 ϕ , 我们按以下的方法调整延时控制电路的时延 Δ :

$$\phi_0 > \phi > -\pi/2 \text{ 时, } \Delta_i > \Delta_{i+1} \quad (13)$$

$$\phi_0 < \phi < \pi/2 \text{ 时, } \Delta_i < \Delta_{i+1}$$

在此, 我们提出了二分搜索波束形成算法。具体如下:

设置初始化条件: $\phi_{\min} = -\pi/2$, $\phi_{\max} = \pi/2$, $\phi_0 = 0$, 并设置收敛门限 e_0 ;

对各阵元接收到的信号进行滑动相关得到一系列脉冲波形的自相关函数;

对各个自相关函数按角度 ϕ_0 进行延时(即信号延时 $\Delta = i \times d \times \sin \phi_0 / c$), 然后计算 $r(t, \phi)$;

由 $r(t, \phi)$, 计算其正、负峰值点连线的斜率 slope;

if $|\text{slope}| < e_0$, break;

if $\text{slope} < 0$, then $\phi_{\min} = \phi_0$, $\phi_0 = (\phi_{\min} + \phi_{\max})/2$, goto ;

if $\text{slope} > 0$, then $\phi_{\max} = \phi_0$, $\phi_0 = (\phi_{\min} + \phi_{\max})/2$, goto ;

一旦满足收敛条件 $|\text{slope}| < e_0$, 算法终止, ϕ_0 收敛于来波入射角 ϕ 。

表 1 波束形成算法仿真结果

来波方位	收敛步数	波束主轴方位	绝对误差	相对误差
20°	9	20.04°	0.04°	0.2 %
40°	11	39.99°	-0.01°	0.025 %
60°	10	59.94°	-0.06°	0.1 %

采用 17 元等距线阵, 即 $m = 8$, 高斯脉冲的脉宽为 $T = 1 \times 10^{-9}$ s, 阵元间距为 $d = 0.2 \times c \cdot T$, 设置收敛门限为 $e_0 =$

0.01, 来波方位分别为 20° 、 40° 、 60° 。表 1 给出了波束形成算法的仿真结果。

仿真结果表明, 算法收敛速度快, 收敛步数大约在 1 ~ 15 步之间, 能实时调整阵列的波束主轴方向对准来波方位。

5 结论

本文分析了一种用于超宽带系统的脉冲信号模型和阵列天线模型, 并推导了高斯脉冲及其自相关函数的时域特性, 并定义了阵列天线的峰值幅度方向图。基于该阵列天线模型, 文章提出了二分搜索波束形成算法并对其进行了仿真, 结果表明该算法时间复杂度低, 收敛速度快。

参考文献:

- [1] Moe Z. Win, Robert A Scholtz. Impulse radio: How it works[J]. IEEE Communication Letters, 1998, 2(2): 36 - 38.
- [2] Malek GM Hussain. Principle of space-time array processing for ultra-wide-band impulse radar and radio communications[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, May 2002, 51(3): 393 - 403.
- [3] S A Collins Jr, B L Anderson, C Liddle. True time delay with binary time delay control for large arrays[A]. Proc 22nd Annu Antenna Application Symp[C]. Urbana: PAAAS, 1998. 113 - 126.

作者简介:

王 锋 男, 1975 年 10 月生于湖南新田, 1998 年和 2004 年分别获解放军信息工程大学学士、硕士学位, 现为解放军信息工程大学讲师, 研究方向为信号与信息处理, 1999 年获军队科技进步四等奖一项, 2001 年和 2003 年获军队科技进步三等奖两项, 在国内重要期刊发表论文 10 余篇。E-mail: wf32018@163.com.

牛忠霞 1943 年 12 月生于河北枣强, 1968 年毕业于北京大学无线电电子学系, 现为解放军信息工程大学教授, 博士生导师, 中国航空学会通信导航分会副主任, 全军优秀教员, 研究方向为电磁场与微波技术、光通信等, 在国内重要刊物和国内外会议发表论文 30 余篇, 出版专著 1 本。目前承担国家自然科学基金等课题 2 项。