

脉内调频、脉间步进跳频雷达信号的模糊函数

贺志毅, 汤斌, 郝祖全

(航天科工集团二院二十五所, 北京 100854)

摘要: 本文结合新型体制脉内调频、脉间步进跳频雷达, 分析推导了该信号形式的模糊函数. 根据负型模糊函数的定义导出了完整的模糊函数表达式, 最后对该模糊函数的特性进行了简要的分析, 得出了利用这一信号能够得到距离维和速度维高分辨力的结论. 利用这一信号构成了一个试验系统, 进行了室内及外场试验, 验证了理论的有效性.

关键词: 脉内调频; 步进跳频; 模糊函数; 高分辨

中图分类号: TN959.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 07-1118-03

The Ambiguity Function of Intra-Pulse Chirp and Inter-Pulse Stepped Frequency Signal

HE Zhi-yi, TANG Bin, HAO Zu-quan

(No. 25 Institute of No. 2 Research Academy of CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: The ambiguity function of intra-pulse chirp and inter-pulse stepped frequency signal is analyzed and obtained according to new type radar. Firstly, the expression of the signal is given. Then the concrete expression of ambiguity function of the signal is derived in accordance with the negative-type definition of ambiguity function. Last the brief analyzing of the ambiguity function is completed and the conclusion that the signal can achieve the high resolutions of range and speed is proved. Making use of the signal, a test system is developed and the ability of high range resolution is verified.

Key words: intra-pulse chirp; stepped frequency; ambiguity function; high resolution

1 引言

获取距离维高分辨的途径很多, 如采用极窄脉冲的方式、瞬时大带宽线性调频(chirp)信号、步进跳频合成宽带信号及脉内调频、脉间步进跳频信号等. 采用极窄脉冲难以获得很远的探测距离, 因此只能应用在近距探测雷达中. 瞬时大带宽 chirp 信号, 能够满足较远的距离探测距离和分辨力要求, 但它在实现三通道角跟踪时, 存在三路温度稳定性问题, 距离高分辨角度信息难以提取, 且高速信号采集及处理的难度极大. 采用步进跳频信号来满足雷达的探测距离和高分辨是一种较佳的选择, 它通过发射接收窄带信号使雷达系统的实现难度大为降低, 通过信号处理的合成宽带处理仍然可以获得距离维的高分辨, 但该信号跳频间隔受到发射脉宽的限制, 要合成大带宽需要较多的跳频点数, 这一方面降低了雷达的数据率, 另一方面对运动目标回波的相位补偿难以实现. 脉内调频、脉间步进跳频信号是在步进跳频信号基础上提出来的, 它能弥补步进跳频的缺陷, 即该信号可以具有较大的跳频间隔, 合成同样的带宽需要较少的跳频点数, 这对运动补偿的实现带来极大的好处, 同时单个脉冲的距离分辨力也较高, 有利于多目标分辨、分选. 脉内调频、脉间步进跳频信号具有良好特性.

2 模糊函数的推导

模糊函数是对雷达信号进行分析研究和波形设计的有效工具. 模糊函数仅由发射波形决定, 它反映了雷达发射何种波

形、在采用最优信号处理条件下系统将具有什么样的分辨力、模糊度、测量精度和杂波抑制能力^[1]. 脉内调频、脉间步进跳频雷达是一新型体制, 它是在脉间步进跳频雷达的基础上将简单的点频子脉冲用线性跳频子脉冲所替代后而得到的, 这种信号形式能否满足实际雷达的性能要求, 需要分析研究这种信号的模糊函数.

脉内调频、脉间跳频信号的时域归一化包络表达式为:

$$u(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r}{T_1}\right) e^{jK(t-iT_r)^2} e^{j(2i\pi ft)} \quad (1)$$

其中 $\text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) = \begin{cases} 1, & -T_1/2 \leq t \leq T_1/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$, T_r 为发射脉冲的重复频率, T_1 为脉冲宽度, K 为线性调频信号调频斜率.

根据式(1)可以得到:

$$u^*(t-iT_r) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r-iT_r}{T_1}\right) e^{-jK(t-iT_r-iT_r)^2} e^{-j2i\pi f(t-iT_r)}$$

采用负型模糊函数定义, 可写出模糊函数的定义式:

$$\begin{aligned} (\rho, f_d) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t-iT_r) e^{j2\pi f_d t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r}{T_1}\right) e^{jK(t-iT_r)^2} e^{j(2i\pi ft)} \\ &\quad \cdot \sum_{m=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-iT_r-mT_r}{T_1}\right) e^{-jK(t-iT_r-mT_r)^2} \\ &\quad \cdot e^{-j2\pi m f(t-iT_r)} e^{j2\pi f_d t} dt \end{aligned}$$

令 $t-iT_r = t$, 则有:

$$\begin{aligned}
 (, f_d) &= \int_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) e^{j K^2 t^2} e^{j f(t+iT_r)} \\
 &\cdot \int_{m=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - (i-m)T_r}{T_1}\right) e^{-j K(t - (i-m)T_r)^2} \\
 &\cdot e^{-j 2 m f(t+iT_r)} e^{j 2 f_d(t+iT_r)} dt \\
 &= \int_{i=0}^{N-1} \int_{m=0}^{N-1} e^{j 2 f_d t} e^{-j 2 m f t} e^{j 2 m f} e^{j 2 f_d T_r} \\
 &\cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) e^{j K^2 t^2} \text{rect}\left(\frac{t - (i-m)T_r}{T_1}\right) \\
 &\cdot e^{-j K(t - (i-m)T_r)^2} e^{j 2 l(i-m) f + f_d t} dt \\
 &= \int_{i=0}^{N-1} \int_{m=0}^{N-1} e^{j 2 f_d t} e^{-j 2 m f t} e^{j 2 m f} e^{j 2 f_d T_r} \\
 &\cdot \int_{LM} - pT_r, p f + f_d] \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中 $i - m = p$, $(, f_d)$ 为线性调频子脉冲的模糊函数^[1]:

$$\left| \int_{LM} (, f_d) \right| = \begin{cases} T_1 e^{j l(f_d + K)(T_1 - | |) - K^2 l} (1 - \frac{| |}{T_1}) \\ \frac{\text{sin} l (K + f_d) (T_1 - | |)}{(K + f_d) (T_1 - | |)} , | | T_1 \\ 0, \quad | | T_1 \end{cases} \quad (3)$$

由于 $i - m = p$, 对于 p 取 $-N+1 \sim N-1$ 间任意一个常数, i 与 m 间为线性关系.

当 $-(N-1) < p < 0$ 时, m 的取值为 $0 \sim N-1$, 所以 $i = p + m$ 的最小取值为 0 , 最大取值为 $N-1+p$, 这时有:

$$\begin{aligned}
 (, f_d) &= \int_{p=-N+1}^{-1} \int_{i=0}^{N-1+p} e^{j 2 i(p f T_r + f_d T_r + f)} e^{-j 2 p f} \\
 &\cdot \int_{LM} - pT_r, p f + f_d] \\
 &= \int_{p=-N+1}^{-1} e^{-j 2 p f} \\
 &\cdot \begin{cases} e^{j l(f_d + K)(T_1 - | |) - K^2 l} e^{-j 2 p f} e^{j (N+p-1)(p f T_r + f_d T_r + f)} \cdot \frac{\text{sin} l (N - | p|) (p f T_r + f_d T_r + f)}{\text{sin} l (p f T_r + f_d T_r + f)} \\ \cdot T_1 (1 - \frac{| | - pT_r|}{T_1}) \left| \frac{\text{sin} l [K(-pT_r) + (p f + f_d)] (T_1 - | | - pT_r|)}{[K(-pT_r) + (p f + f_d)] (T_1 - | | - pT_r|)} \right| , | | - pT_r| T_1 \\ 0 \end{cases} \quad (6)
 \end{aligned}$$

取其模值为:

$$\left| \int_{LM} (, f_d) \right| = \begin{cases} \left| \frac{\text{sin} l (N - | p|) (p f T_r + f_d T_r + f)}{\text{sin} l (p f T_r + f_d T_r + f)} \right| \\ \cdot \left| T_1 (1 - \frac{| | - pT_r|}{T_1}) \left| \frac{\text{sin} l [K(-pT_r) + (p f + f_d)] (T_1 - | | - pT_r|)}{[K(-pT_r) + (p f + f_d)] (T_1 - | | - pT_r|)} \right| \right| , | | - pT_r| T_1 \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

其它

3 该模糊函数的特性

式(7)为脉内调频、脉间步进跳频模糊函数的通用表达式,它反映了 p 在各种取值条件下,模糊函数的形状.对于简单步进跳频信号,令式(7)中的 $K=0$ 就得到该信号的模糊函数通用表达式.为了说明这一函数的时间分辨力,令 $f_d=0$ 和 $p=0$,可以得到(平面的模糊函数主峰:

$$\left| (, 0) \right| = \begin{cases} \left| \frac{\text{sin} N f / \text{sin} f}{\text{sin} K (T_1 - | |)} \right| \cdot \left| T_1 (1 - | | / T_1) \right| \\ \cdot \left| \frac{\text{sin} K (T_1 - | |)}{K (T_1 - | |)} \right| \cdot N, | | T_1 \\ 0, \quad \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 &\cdot \frac{1 - e^{j 2 (N+p)(p f T_r + f_d T_r + f)}}{1 - e^{j 2 (p f T_r + f_d T_r + f)}} \text{LM} [- pT_r, p f + f_d] \\
 &= \int_{p=-N+1}^{-1} e^{-j 2 p f} e^{j (N+p-1)(p f T_r + f_d T_r + f)} \\
 &\cdot \frac{\text{sin} l (N+p)(p f T_r + f_d T_r + f)}{\text{sin} l (p f T_r + f_d T_r + f)} \\
 &\cdot \text{LM} [- pT_r, p f + f_d] \quad (4)
 \end{aligned}$$

当 $0 \leq p < N-1$ 时, m 的取值为 $0 \sim N-1$, $i = p + m$ 的最小取值为 p , 最大取值为 $N-1$. 这时有:

$$\begin{aligned}
 (, f_d) &= \int_{p=0}^{N-1} \int_{i=p}^{N-1} e^{j 2 i(p f T_r + f_d T_r + f)} e^{-j 2 p f} \\
 &\cdot \text{LM} [- pT_r, p f + f_d] = \int_{p=0}^{N-1} e^{-j 2 p f} \\
 &\cdot \frac{e^{j 2 p(p f T_r + f_d T_r + f)} [1 - e^{j 2 (N-p)(p f T_r + f_d T_r + f)}]}{1 - e^{j 2 (p f T_r + f_d T_r + f)}} \\
 &\cdot \text{LM} [- pT_r, p f + f_d] = \int_{p=0}^{N-1} e^{-j 2 p f} \\
 &\cdot \frac{e^{j (N+p-1)(p f T_r + f_d T_r + f)} \text{sin} l (N-p)(p f T_r + f_d T_r + f)}{\text{sin} l (p f T_r + f_d T_r + f)} \\
 &\cdot \text{LM} [- pT_r, p f + f_d] \quad (5)
 \end{aligned}$$

综合式(4)、(5),可以得到脉内调频、脉间步进跳频模糊函数为:

$$\begin{aligned}
 (, f_d) &= \int_{p=-N+1}^{N-1} e^{-j 2 p f} \\
 &\cdot \frac{e^{j (N+p-1)(p f T_r + f_d T_r + f)} \text{sin} l (N - | p|) (p f T_r + f_d T_r + f)}{\text{sin} l (p f T_r + f_d T_r + f)} \\
 &\cdot \text{LM} [- pT_r, p f + f_d] = \int_{p=-N+1}^{N-1} (, f_d)
 \end{aligned}$$

时间分辨力由两部分决定,一部分为脉压后的近似 sinc 包络,另一部分为 $(\text{sin} N f) / (\text{sin} f)$. sinc 包络的时间分辨力约为 $1/B$, 而 $(\text{sin} N f) / (\text{sin} f)$ 的时间分辨力为 $1/(N f)$. 通常选择 $N f \gg B$, 因此脉内调频、脉间步进跳频信号的时间分辨力为 $1/(N f)$. 可见采用脉内调频、脉间步进跳频信号能够得到距离维的合成高分辨结果.

模糊函数同时也表征了信号所具有的速度分辨力,令 $= 0, p=0$, 由式(7)可以得到 f_d 平面的主峰:

$$\left| (0, f_d) \right| = N \cdot \left| \frac{\text{sin} N f_d T_r}{\text{sin} f_d T_r} \right| \cdot \left| T_1 \frac{\text{sin} f_d T_1}{f_d T_1} \right| \quad (9)$$

从式中可见,该信号也具有良好的速度分辨力,其 -4dB

分辨力为 $1/(NT_r)$ 。

脉内调频、脉间跳频信号通过适当的处理具有获得距离和速度高分辨的潜力,对 N 个跳频信号实现 IDFT 就可获取时域的高距离分辨. 这一信号具有时频高分辨的特性,模糊函数在峰值点位置处尖锐陡峭、变化剧烈,测量目标回波信号距离和速度时,取值的变化范围很小,因此它具有获取极高的测距、测速精度的潜力. 对于低距离分辨信号,雷达照射目标时,天线具有一定的波束宽度,照射区域很大,而目标所占的比例很小,因此回波信号的信杂比较低. 脉内调频、脉间调频信号具有很高的距离分辨力,用它获取目标的信息时,天线照射的区域在距离维被分割成极窄的分辨单元,在某些距离分辨单元都是杂波而一些单元含有信号和杂波. 在有用信号所占的极窄的距离分辨单元内,与低分辨的照射区相比,有用信号所占比重相对增大,而照射杂波的区域相对减小,回波信噪比得到了较大的改善,因此这一信号具有较好抑制杂波的性能. 图 1 及图 2 给出了线性调频信号及脉内调频、脉间步进跳频信号的模糊图,从图 2 可见该信号的模糊图为钉型.

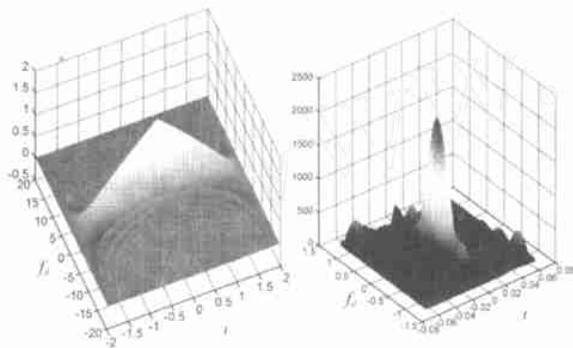


图 1 线性调频信号的模糊函数 $|(\cdot, f_d)|$

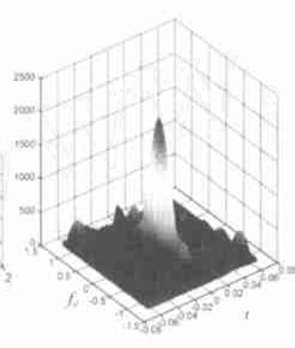


图 2 脉内调频、脉间步进跳频信号的模糊函数 $|(\cdot, f_d)|$

4 试验结果

利用脉内调频、脉间步进跳频信号完成了一套原理试验样机,在室内及外场进行了试验验证,获取了大量的试验数据,验证了脉内调频、脉间步进跳频信号经过合成宽带处理获得距离维高分辨力的能力. 试验系统采用的主要参数为:调频脉冲的带宽为 15MHz、跳频间隔为 12MHz、跳频点数为 16 点. 系统合成带宽为 192MHz,合成宽带对应的理论距离分辨力为 0.78m. 下面给出几组测试结果.

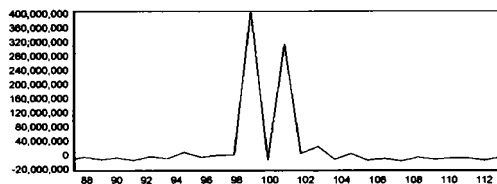


图 3 两个相距为 1.2m 的目标回波处理结果

图 3 为室内测试结果,它给出了相距 1.2m 的两个点目标经过合成宽带处理后得到的距离维图像,图中横坐标为以距离分辨力为间隔的采样点数,纵轴为目标回波的相对幅度.

图 4 为外场试验跟踪起飞飞机时 15MHz 线性调频脉冲压缩后得到的真实飞机目标的距离维图像,图中横坐标为距离值,单位为米,纵坐标为相对幅度值;图 5 为同一架飞机实时得到的合成宽带处理结果,坐标定义同图 4;比较两幅图可以看出图 4 给出的中分辨图不能分辨飞机的距离轮廓,飞机的回波相当于一个点目标,图 5 能够给出飞机目标的强散射点的具体位置,在距离剖面上给出了飞机的轮廓,距离高分辨的效果非常明显.

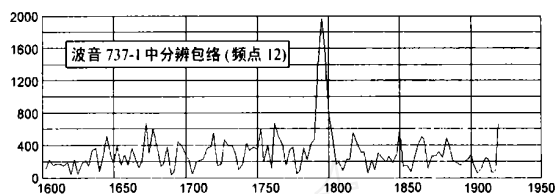


图 4 波音 737 中分辨回波实测数据

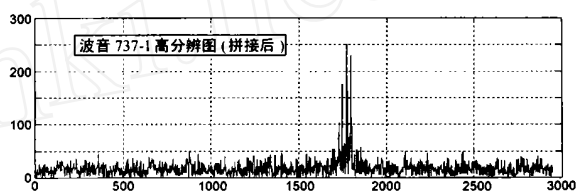


图 5 波音 737 高分辨回波处理结果

5 结论

脉内调频、脉间步进跳频信号利用脉冲内的线性调频信号,易于保证单个发射脉冲具有较大的带宽,结合脉间步进跳频能够实现距离维的高分辨. 从该信号的模糊函数推导分析可以看出,这一信号具有良好的距离和速度分辨能力,它的距离分辨力与步进跳频合成宽带信号的距离分辨力基本相同. 从室内及外场试验测试结果可以看出,这一信号能够实现距离维的高分辨力.

参考文献:

- [1] 林茂庸,柯有安. 雷达信号理论 [M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [2] A W 里海捷克. 雷达分辨理论 [M]. 北京:科学出版社,1973.
- [3] 郑学和. 高分辨力雷达导引头多维信息提取技术研究 [D]. 北京:航天二院,1998.
- [4] D R Wehner. High Resolution Radar [M]. Boston:Artech House,1987.

作者简介:



贺志毅 男,1961 年 9 月生于北京,研究员,博士研究生,主要研究方向为毫米波雷达系统.