

高动态扩频信号捕获的多普勒补偿

方科

(中国电子科技集团公司 第十研究所, 成都 610036)

摘要:分析了多普勒效应对扩频信号捕获的影响,介绍了对载波多普勒和伪码多普勒频率的补偿方法,研究了对于多普勒变化率的补偿方法,并对该方法进行了相应的仿真。仿真结果表明,引入补偿之后,能够有效减少多普勒频移和变化率对于扩频信号捕获的影响,提高捕获门限。

关键词:扩频;高动态;多普勒补偿

中图分类号:TN914.4

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)07-0122-03

Research on Doppler Compensation in Acquisition of High Dynamic Spread Spectrum Signals

FANG Ke

(China Electronics Technology Group Corporation No. 10 Research Institute, Chengdu 610036, China)

Abstract: Doppler effect influencing on acquisition of spread spectrum signal in high dynamic is analysed, compensation method of carrier Doppler and code Doppler is introduced. A compensation method of carrier Doppler frequency change rate is presented and simulated. Simulation results show compensation method can eliminate the influence signal acquisition aroused by Doppler frequency and change rate. It can improve threshold of acquisition.

Key words: spread spectrum; high dynamic; Doppler compensation

高动态环境下,载体与接收机间的径向运动和载体加速度等机动特性会给接收信号带来明显的多普勒效应影响,即产生载波多普勒频移、伪码多普勒频移和多普勒变化率。载波和伪码频偏将造成扩频信号捕获时接收伪码和本地伪码产生相干积累损耗,引起捕获性能降低。多普勒变化率的存在一方面带来载波和伪码频频偏变化,加剧相干积分增益的损耗;另一方面直接导致载波多普勒频率测频精度的降低影响后续跟踪环路的锁定。因此高动态环境下的扩频信号捕获,多普勒补偿显得至关重要。现有文献大多仅考虑了载波频偏及伪码频偏的多普勒补偿,未考虑对多普勒变化率的补偿。因此有必要研究高动态条件下多普勒变化率的补偿方法。

收机间的径向运动所产生的载波多普勒频移为^[1]

$$f_d = \frac{f_s \times v \times \cos\theta}{c} \quad (1)$$

其中: c 为光速; θ 为载体运动方向与载体接收信号方向夹角。载波多普勒频移造成的相关峰值幅度下降为 $\text{sinc}(\frac{2\pi f_d T}{2})$, T 为相干积分时间。相关峰值会随着载波多普勒频移 f_d 的增大而减小。为保证多普勒频移与相关积分时间造成的衰减小于1 dB,应满足以下公式^[2]

$$|2\pi f_d T| \leq \frac{\pi}{2} \quad \text{或} \quad T \leq \frac{1}{4f_d} \quad (2)$$

载波多普勒补偿方法如下:首先根据多普勒频偏的最大范围,把捕获的频域搜索范围平均分为若干频率区间,各频率区间的大小即多普勒补偿步进量由(2)式可得,然后根据下变频中心频点 ω_c 和不同的多普勒补偿量 ω_d 产生不同的本地载波频率分别与接收信号进行混频滤波,进而完成载波

1 载波及伪码的多普勒补偿

1.1 载波多普勒补偿

若载体运动速度为 V ,载波频率为 f_s ,那么由于载体与接

多普勒频偏的补偿,其原理如图 1 所示。

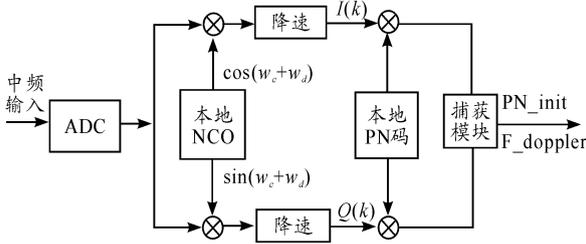


图 1 载波多普勒补偿示意图

1.2 伪码多普勒补偿

载体与接收机间的径向运动除会造成载波频率偏移以外,还会带来伪码多普勒。假定载波多普勒频偏为 f_d ,则相应伪码多普勒为^[3]

$$f_{cd} = \frac{f_c \times f_d}{f_{cf}} \quad (3)$$

其中: f_c 表示码速率; f_{cf} 表示载波频率。在弱信号条件下,一般相关积分时间较长,伪码多普勒将造成接收信号与本地信号码相位的滑动,若用 ε 表示接收伪码信号与本地伪码信号的相位差,则伪码时延造成的相关峰值幅度下降为 $(1 - \varepsilon)$ 倍。

由式(3)可知,码多普勒与载波多普勒间存在同比例关系,因此在伪码捕获过程中可以根据载波多普勒计算其对应的码多普勒并进行补偿。补偿方法如下:首先根据载波多普勒补偿步增量 Δf_d 计算伪码多普勒补偿量 Δf_{cd} ,然后根据这个补偿量实时调整本地伪码速率,进而完成伪码多普勒频偏的补偿。

2 多普勒变化率的补偿

目前扩频信号捕获一般采用前级分段部分相关,后级 FFT 的方法^[4],通过采用频率分槽并行多通道进行载波多普勒补偿并以载波频偏辅助伪码多普勒补偿来完成捕获。典型的频率分槽并行多通道捕获流程如图 2 所示。

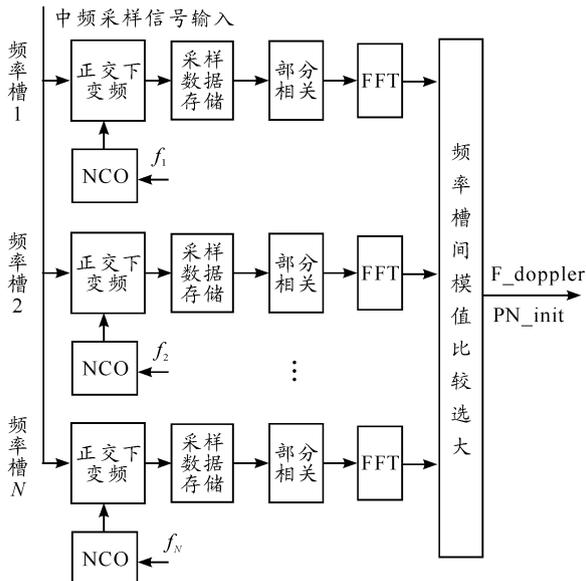


图 2 典型频率分槽并行多通道捕获流程

然而在高动态条件下载波多普勒频偏范围和伪码多普勒频率变化率都很大,因此仅仅依靠对载波多普勒频率和伪码多普勒频率进行补偿来降低相关损耗是不够的。当收发双方伪码相位对齐时,第一级分段部分相关结果本应该是频率值为收发双方频差的复正弦信号,且短时固定,但在有多普勒变化率存在的情况下,第一级分段部分相关结果等效于线性调频信号 $x(t) = Ae^{j2\pi(f_i + \frac{1}{2}a_i t^2)}$,这将严重影响第二级 FFT 做功率谱估计时的相干累加增益。因此必须考虑对高动态条件下的多普勒变化率也进行补偿,多普勒变化率的补偿原理如图 3 所示。

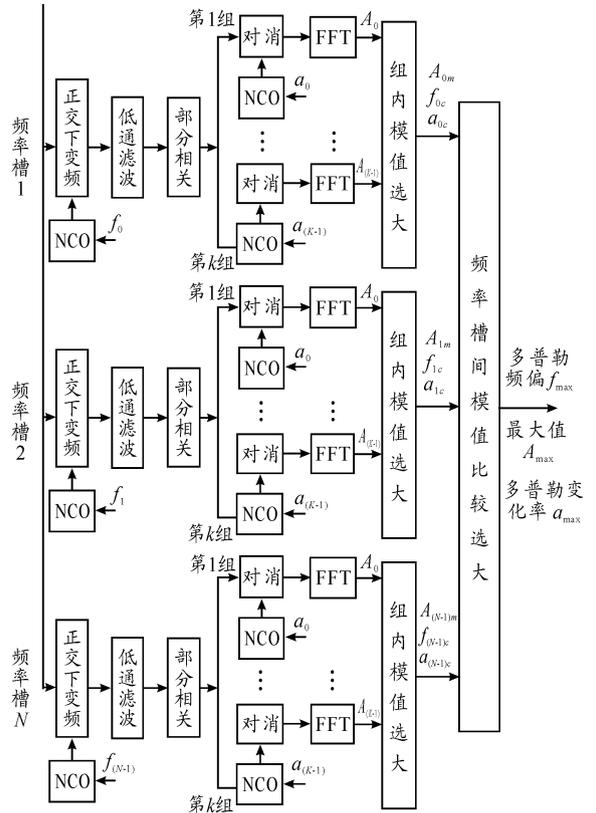


图 3 多普勒变化率补偿流程

首先根据多普勒频偏的最大范围,把捕获的频域搜索范围平均分为 N 个频率槽 $f_i (i = 0 \sim N - 1)$,在下变频的同时完成对各个频率槽的载波多普勒补偿,并计算相应伪码多普勒补偿量,调整各个频率槽数据降采样时的伪码速率以完成对伪码多普勒的补偿。

在每个频率槽内继续划分 K 个多普勒变化率补偿区间,并预置对应划分的多普勒频率变化率补偿值 $a_i (i = 0 \sim k - 1)$ 驱动 NCO 生成 K 个本地信号 $e^{-j2\pi(\frac{1}{2}a_i t^2)}$,用它们分别和部分相关后信号 $e^{j2\pi[f_i - f_c + \frac{1}{2}a_0 t^2]}$ 相乘,得到对消后信号 $e^{j2\pi[f_i - f_c + \frac{1}{2}(a_0 - a_i)t^2]}$,该对消后信号的频率表达式可以写为^[5-6]

$$f_{\Delta} = (f_0 - f_i) + (a_0 - a_i)t \quad (4)$$

令 $\Delta f = f_0 - f_i, \Delta a = a_0 - a_i$ 可得

$$f_{\Delta} = \Delta f + \Delta \alpha \times t \quad (5)$$

如果某一个多普勒变化率预置值 a_i 和真实值 a_0 最接近, 则对消后残留的多普勒变化率 $\Delta \alpha$ 最小, 做 FFT 变换后能得到最大功率谱峰值。因此对这 K 组对消后的信号 $e^{j2\pi(\Delta f t + \frac{1}{2}\Delta \alpha t^2)}$ 做 FFT, 然后进行通道内组间模值选大, 通道最大模值对应的那个步进值即是对多普勒变化率真实值 a_0 的估计, 该组 FFT 结果中具有最大模值的那根谱线对应的频率即是对载波多普勒频率 f_0 准确估计, 这样就完成了一个通道对频率和频率变化率的估计。

增加多普勒变化率补偿后的扩频信号捕获算法可以分为以下几个步骤:

1) 采样中频信号, 按照不同的频率槽区间下变频后进行存储, 同时按照时间不确定度的要求生成一定初始相位的本地伪码序列。

2) 利用分段部分匹配滤波器技术, 计算出接收到信号与本地伪码序列的 N 点 M 段的部分相关结果。

3) 按多普勒变化率补偿区间, 并行对这组相关结果数据做 K 组 FFT, 将 K 个结果组内比较, 选取最大值并记录当前的伪码相位、多普勒频率和变化率。

4) 对各个频率槽间的最大值进行比较, 得到最终的伪码相位、多普勒频率和变化率。

滑动本地码相位, 重复步骤 2) ~ 4), 直至捕获完成为止。

3 仿真结果

系统环境参数为: 以扩频码速率 $B = 10.23$ Mbps、码长 $L = 1023$ 、载波多普勒频偏范围 ± 1 MHz、最大多普勒变化率 ± 200 kHz/s、 $C/N_0 = 38$ dBHz 为例,

选取前级分段部分相关点数 $N = 256$, 后级 FFT 点数 $M = 2048$, 第一级相关积分时间为 $T = N/2B \approx 12.5 \mu\text{s}$, 根据相关积分时间与载波多普勒分辨范围的关系 $T \leq 1/4\Delta f_d$, 可得多普勒分辨范围 $\Delta f_d \leq \pm 20$ kHz。假设 $f_{rf} = 20$ GHz, 载波多普勒补偿步进 $\Delta f_d = \pm 20$ kHz 则对应伪码多普勒补偿为

$$\Delta f_{cd} = \frac{f_c \times \Delta f_d}{f_{rf}} = \frac{10.23 \times 10^6 \times 20 \times 10^3}{20 \times 10^9} = 10.23 \text{ Hz} \quad (6)$$

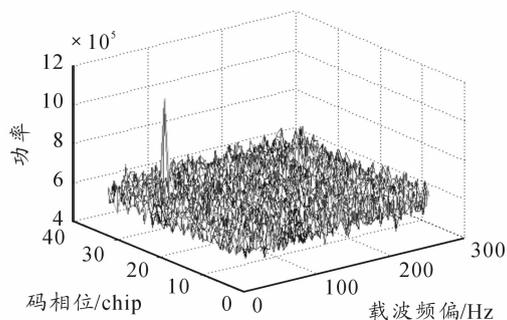
对于 ± 200 kHz/s 载波多普勒变化率, 采用对该多普勒变化率分区间补偿, 并行搜索的办法, 在设计中按 $a_i = \pm 25$ kHz/s 一个频率变化率步进, 整个并行 8 路来补偿 ± 200 kHz/s 的载波多普勒变化率。

1) 当扩频信号无载波多普勒频率变化率的情况下, 对信号进行载波多普勒补偿和伪码多普勒补偿后的仿真结果如图 4(a) 所示。

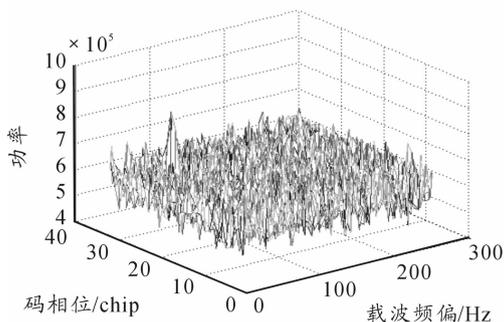
2) 当扩频信号有载波多普勒频率变化率的情况下, 只对信号进行载波多普勒补偿和伪码多普勒补偿, 不做多普勒变化率补偿后的仿真结果如图 4(b) 所示。

3) 当扩频信号有载波多普勒频率变化率的情况下, 对信号进行载波多普勒补偿、伪码多普勒补偿以及多普勒变化

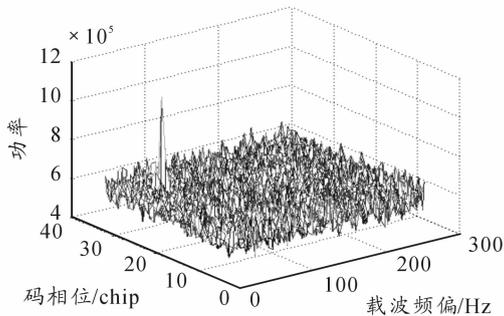
率补偿后的仿真结果如图 4(c) 所示。



(a) 仿真结果 1



(b) 仿真结果 2



(c) 仿真结果 3

图 4 不同多普勒补偿的仿真效果

4 结束语

高动态环境下载波和伪码多普勒频偏的存在将造成扩频信号捕获时产生相干积累损耗, 而上百 kHz/s 的多普勒频率动态变化会加剧这种损耗, 对扩频信号捕获性能造成严重影响。仿真结果表明在有较高多普勒频率变化率的高动态条件下只引入载波和伪码多普勒补偿, 无法有效减少多普勒频移和变化率对于扩频信号捕获的影响, 必须对多普勒频率变化率同时进行相应的补偿, 这样不仅可以提高捕获性能, 还能同时得到多普勒频率变化率的估算, 有效提高多普勒频偏估计精度。但该算法在载波频率分槽的同时还需要对多普勒变化率进行分槽, 对硬件资源的占用会增加较多, 因此在实际应用中还需结合捕获性能和资源占用来综合考虑。

(下转第 136 页)