

基于多重频脉冲串信号解速度模糊的研究

夏梦颖^① 苏卫民^{*①} 顾红^① 卢建春^②

^①(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

^②(94647 部队 福州 350000)

摘要: 针对双重频解速度模糊系统中, 信号参数选择不合理导致解速度模糊存在量化误差的问题, 推导了双重频解速度模糊的量化要求。为了增大最大不模糊速度, 该文提出多层解模糊系统, 提出了一种四重频脉冲串解速度模糊的模型, 推导了四重频信号脉冲个数的下界, 并简化为了三重频脉冲串信号模型。仿真验证了理论推导的正确性。

关键词: 多重频雷达; 解速度模糊; 量化要求; 1 维集算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)12-2860-06

DOI: 10.11999/JEIT170259

Research on Velocity Ambiguity Resolution for Multiple PRF Radar

XIA Mengying^① SU Weimin^① GU Hong^① LU Jianchun^②

^①(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

^②(94647 Troops, Fuzhou 350000, China)

Abstract: In dual pulse repetition frequencies radar systems, mathematical deduction of the number of pulse repetition intervals required to satisfy quantitative requirements is presented to resolve velocity ambiguity. Multiple layer systems to increase the maximum unambiguous velocity are proposed. A new model of quadruple pulse repetition frequencies signal is proposed. The lower bound of the number of pulse repetition intervals required to satisfy quantitative requirements is deduced and quadruple pulse repetition frequencies signal is simplified as triplet pulse repetition frequencies signal. Simulation results validate the accuracy of our deduction.

Key words: Multiple pulse repetition frequencies radar; Resolving velocity ambiguity; Quantitative requirements; Clustering algorithm

1 引言

在脉冲多普勒雷达中, 常常会遇到求解速度模糊和距离模糊的问题。低重复频率(LPF)脉冲多普勒雷达有速度模糊而无距离模糊, 中重复频率(MPF)既有速度模糊又有距离模糊, 而高重复频率(HPF)一般只出现距离模糊。由于目标最大速度 V_{\max} 、雷达工作波长 λ 和脉冲重复周期 T_r 之间满足如下关系: $V_{\max} = \lambda/4T_r$ [1]。测量高速运动目标时, 在单一脉冲重复频率下, 如果目标速度高于 V_{\max} , 从而引起目标速度在多普勒域上交叠, 称之为速度模糊。为了消除这个速度模糊, 就需要提高 V_{\max} , 而雷达工作波长 λ 又和脉冲重复周期 T_r 是雷达的固有参数, 较大地改变其值由于受到其它条件的限制而使它成为不可能。提高 V_{\max} 只能通过不同 λ 和不同 T_r

的相互组合才能得到。不同的组合方式也就形成不同的模糊求解方法。文献[2]介绍了速度模糊问题, 文献[3-5]对多重频模糊分辨问题利用中国余数定理(CRT)或类似算法来实现模糊分辨, CRT法由于整数要求而使得实际的多普勒频移估计存在较大偏差。文献[6,7]介绍了解速度模糊在多载频MIMO雷达中的应用, 文献[8]提出了一种步进频率信号认知雷达波形优化设计方法。1维集算法[9]能够适应测量值为小数时的估计, 但需要进行高维穷举搜索。文献[10]提出了解模糊的复值自适应迭代方法, 计算量较大。

在多重频解速度模糊系统中, 如何选取合适的重频数、脉冲重复周期和脉冲个数, 使能解模糊的速度范围尽量大并且解速度模糊没有量化误差成了本文的研究方向。在雷达的距离分辨率和目标最高速度确定的条件下, 目标最高速度跨过一个距离分辨单元的时间确定, 对于高速目标, 则雷达允许对目标的最大积累相干时间有限, 需要选取合适的信号参数以满足测距测速要求。本文将通过推导, 计

收稿日期: 2017-03-29; 改回日期: 2017-09-21; 网络出版: 2017-11-01

*通信作者: 苏卫民 suweiminust@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471198)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61471198)

算脉冲重复数的下界, 使在双重频测速范围内, 解速度模糊时不会出现二义性。提出了一种四重频脉冲串解速度模糊的新方式, 可以获得更大的速度不模糊范围, 并根据双重频脉冲串信号解速度模糊的量化要求, 推导出四重频信号脉冲个数的下界, 随后简化了四重频脉冲串信号为三重频脉冲串信号。

2 问题模型

解模糊实际上是多维有限空间的点到 1 维有限空间点的信号映射。由数据选取和数据处理的特点决定了速度解模糊算法有别于距离解模糊算法。在距离解模糊算法中, 多维有限空间中每一维空间的数据个数不一样, 各维空间数据的采样间隔一样, 此时可以按中国余数定理求解距离模糊。速度模糊求解算法所遇到的情况正好相反, 多维有限空间中各维空间的数据个数一样, 而数据之间的采样间隔不一样。这就决定了速度解模糊算法有别于距离解模糊算法, 中国余数定理只能有条件地应用^[11]。

解模糊算法要求多维有限空间和 1 维有限空间的点是一一对应的。速度模糊的实际形成过程是 1 维有限空间到多维有限空间的变换, 解模糊只不过是其逆过程变换而已。因而在所确定的最大范围内, 要求多维有限空间映射到 1 维有限空间的点不会出现二义性。由于频率域各维空间有不同的量化间隔, 当采样个数较小时, 在中国余数定理所确定的最大不模糊频率范围内, 保证不了多维有限空间的点到 1 维有限空间的点不会出现二义性, 那么就会出现由于量化误差造成的解速度模糊误差。

本文设计的多重频脉冲串雷达主要功能是对给定区域的高速目标进行搜索和跟踪, 探测进入该区域的运动目标, 并对这些目标进行捕获跟踪, 以获得这些目标的距离、多普勒、角度等信息, 进一步对目标进行精确测量, 实时确定目标位置坐标。对于高速目标, 则雷达允许对目标的最大积累相干时间有限, 需要利用多重频脉冲串信号解决速度模糊。为了讨论这种由于多维有限空间的点到 1 维有限空间的点出现二义性造成的解模糊误差, 设雷达发射 M 个靠近的重频 $f_{r1}, f_{r2}, \dots, f_{rM}$ ($\Delta f_{r,i} = f_{r,i+1} - f_{r,i} \ll f_{r,i} < f_{r,i+1}, i = 1, 2, \dots, M-1$) 脉冲串信号, 每个 CPI 中有 N 个脉冲信号, 信号的基本处理流程为: A/D \rightarrow DDC \rightarrow 脉冲压缩 \rightarrow DBF \rightarrow MTD \rightarrow CFAR 检测 \rightarrow 目标凝聚 \rightarrow 目标参数获取。多重频雷达发射信号波形如图 1 所示。

3 解速度模糊量化要求理论推导

3.1 双重频速度量化要求理论推导

由 FFT 测速原理知, 第 1 种 CPI 测速范围是

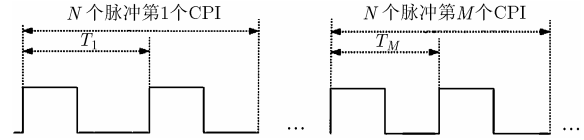


图 1 多重频雷达发射信号波形(重频数为 M)

$(-V_1, V_1), V_1 = \lambda/4T_1$, 第 1 种 CPI 速度门大小为 $2V_1/N$ 。第 2 种 CPI 测速范围是 $(-V_2, V_2)$, $V_2 = \lambda/4T_2$, 第 2 种 CPI 速度门大小为 $2V_2/N$ 。两种 CPI 解速度模糊后的测速范围是 $(-V_{\max}, V_{\max})$, 不妨设 $T_1 > T_2$, 那么 $V_{\max} = \lambda/4(T_1 - T_2)$ ^[12,13]。设 $\left[-\frac{V_1}{N} + \frac{2iV_1}{N}, \frac{V_1}{N} + \frac{2iV_1}{N}\right]$ ^[14] 为第 1 种 CPI 的 i 号速度门对应的速度范围, 由于负速度对应的速度门相对正速度对应的速度门有搬移性质, 为了简单起见, 仅考虑速度门标号 $i \geq 0$ 情况, 那么 i 为整数且 $0 \leq i < N/2$ 。 $\left[-\frac{V_2}{N} + \frac{2iV_2}{N}, \frac{V_2}{N} + \frac{2iV_2}{N}\right]$ 为第 2 种 CPI 的 i 号速度门的速度范围, 速度门序号(0,0)指第 1 种 CPI 的速度门序号为 0, 且第 2 种 CPI 的速度门序号也为 0。

真实的速度 V_{rT} 应为 $V_{rT1} = V_{r1} + 2pV_1$, $V_{rT2} = V_{r2} + 2qV_2$ 。其中 V_{r1}, V_{r2} 分别为 T_1, T_2 周期下估计的多普勒速度, 估计的速度可能存在速度模糊, p 和 q 为模糊数且为整数。由于测量误差和量化误差的存在, 两个周期测出来的速度并不完全相等。使用 1 维集算法来解决速度模糊, 对于双重频来说, 1 维集算法即对所有在测速范围内的 p, q 的取值, 选取其中使 $|V_{rT1} - V_{rT2}|$ 最小的 p, q , 用 C_1 和 C_2 分别表示该绝对值的最小值和次小值。如果 C_2 和 C_1 的比大于门限, 将置有效速度标志。

寻找模糊数为(0,0)速度门为(1,0)和模糊数为(1,1)速度门为(1,0)的区间, 因为前者存在, 那么希望后者即模糊数为(1,1)的速度门为(1,0)区间为空集。模糊数为(0,0)速度门为(1,0)的速度区间为 $\left[\frac{V_1}{N}, \frac{V_2}{N}\right]$ ^[15]。第 1 种 CPI 模糊数为 1 速度门为 1 的速度区间为 $\left[2V_1 + \frac{V_1}{N}, 2V_1 + \frac{3V_1}{N}\right]$ 。第 2 种 CPI 模糊数为 1 速度门为 0 的速度区间为 $\left[2V_2 - \frac{V_2}{N}, 2V_2 + \frac{V_2}{N}\right]$ 。希望没有速度门相同而模糊数不同的速度, 那么希望模糊数为(1,1)的速度门为(1,0)区间为空集。得到 $2V_1 + \frac{3V_1}{N} < 2V_2 - \frac{V_2}{N}$, 则有

$$N > \frac{1}{2} \left(\frac{4V_1}{V_2 - V_1} + 1 \right) \quad (1)$$

因为 $V_2 - V_1 \ll V_1 < V_2$, 模糊数为(0,0)速度门为(1,0)的速度区间 $\left(\frac{V_1}{N}, \frac{V_2}{N}\right)$ 为速度门最短的区间, 即第1种 CPI 模糊数为0速度门为1的速度区间和第2种 CPI 模糊数为0速度门为0的速度区间交集最小且不为空集, 由速度门的线性叠加性可知, 模糊数为(1,1)速度门为(1,0)区间不存在时对 N 的要求最为严格。综上, 在双重频测速范围 $\left[-\frac{\lambda}{4(T_1 - T_2)}, \left(\frac{\lambda}{4(T_1 - T_2)}\right)\right]$ 内, 当 $N > \frac{1}{2} \left(\frac{4V_1}{V_2 - V_1} + 1 \right)$ 时, 解速度模糊不会出现二义性。

3.2 当脉冲个数不同时双重频速度量化要求理论推导

若 $N_m, m = 1, 2$ 为第 m 种 CPI 的脉冲个数, 若希望每种 CPI 总时长尽量相等, 则有 $N_1 < N_2$ 。寻找模糊数为(0,0)速度门为(1,0), 第1种 CPI 模糊数为0速度门为1的速度区间为 $\left(\frac{V_1}{N_1}, \frac{3V_1}{N_1}\right)$, 第2种 CPI 模糊数为0速度门为0的速度区间为 $\left(-\frac{V_2}{N_2}, \frac{V_2}{N_2}\right)$ 。

若 $\frac{V_1}{N_1} < \frac{V_2}{N_2}$, 模糊数为(0,0)速度门为(1,0)的速度区间为 $\left(\frac{V_1}{N_1}, \frac{V_2}{N_2}\right)$ 。寻找模糊数为(1,1)速度门为(1,0)的区间, 第1种 CPI 模糊数为1速度门为1的速度区间为 $\left(2V_1 + \frac{V_1}{N_1}, 2V_1 + \frac{3V_1}{N_1}\right)$ 。第2种 CPI 模糊数为1速度门为0的速度区间为 $\left(2V_2 - \frac{V_2}{N_2}, 2V_2 + \frac{V_2}{N_2}\right)$ 。希望没有速度门相同而模糊数不同的速度, 那么希望模糊数为(1,1)的速度门为(1,0)区间为空集。得到 $2V_1 + \frac{3V_1}{N_1} < 2V_2 - \frac{V_2}{N_2}$, 则有

$$3V_1N_2 + V_2N_1 < 2N_1N_2(V_2 - V_1) \quad (2)$$

若 $\frac{V_1}{N_1} > \frac{V_2}{N_2}$, 则 $\left(\frac{V_2}{N_2}, \frac{V_1}{N_1}\right)$ 为速度交集最短的区间。模糊数为(0,0)速度门为(0,1)的速度区间为 $\left(\frac{V_2}{N_2}, \frac{V_1}{N_1}\right)$ 。模糊数为(1,1)速度门为(0,1)。第1种 CPI 模糊数为1速度门为0的速度区间为 $\left(2V_1 - \frac{V_1}{N_1},$

$2V_1 + \frac{V_1}{N_1}\right)$ 。第2种 CPI 模糊数为1速度门为1的速度区间为 $\left(2V_2 + \frac{V_2}{N_2}, 2V_2 + \frac{3V_2}{N_2}\right)$ 。希望没有速度门相同而模糊数不同的速度, 那么希望模糊数为(1,1)的速度门为(0,1)区间为空集。得到 $2V_1 + \frac{V_1}{N_1} < 2V_2 + \frac{V_2}{N_2}$, 则有

$$\frac{V_1}{V_2} < \frac{2N_2 + 1}{N_2} \cdot \frac{N_1}{2N_1 + 1} \quad (3)$$

为简化模型, 下文中均假设每种 CPI 的脉冲个数相同且均为 N 。

3.3 多层解模糊模型建立和速度量化要求理论推导

当双重频信号不模糊测速范围不能满足要求时, 引入第2对参差脉冲串, 第3种脉冲重复周期 T_3 , 第3种 CPI 测速范围是 $(-V_3, V_3)$, $V_3 = \lambda/4T_3$, 第3种 CPI 速度门大小为 $2V_3/N$ 。第4种脉冲重复周期 T_4 , 第4种 CPI 测速范围是 $(-V_4, V_4)$, $V_4 = \lambda/4T_4$, 第4种 CPI 速度门大小为 $2V_4/N$ 。

不妨设 $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$, 且 $T_4 \gg T_1 - T_2 > T_3 - T_4$, 前两 CPI 做第1层解速度模糊的最大不模糊速度 $V_{1\max} = \frac{\lambda}{4(T_1 - T_2)}$, 后两 CPI 做第1层解速度

模糊的最大不模糊速度 $V_{2\max} = \frac{\lambda}{4(T_3 - T_4)}$, 有 $V_{1\max}$

$< V_{2\max}$, 接着由前两 CPI 解过模糊后的速度和后两 CPI 解过模糊后的速度再做第2层解速度模糊, 该最大不模糊速度为

$$V'_{\max} = \frac{\lambda}{4(T_1 - T_2 - T_3 + T_4)} \quad (4)$$

在选取合适的参数条件下, 利用四重频解速度模糊将会获得比双重频更大的不模糊测速范围。由双重频解速度模糊的量化要求可推得四重频解速度模糊的量化要求为

$$N > \frac{1}{2} \left(\frac{4V_1}{V_2 - V_1} + 1 \right) \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right. \quad (5)$$

$$N > \frac{1}{2} \left(\frac{4V_3}{V_4 - V_3} + 1 \right) \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right.$$

图2为多层解速度模糊时最大测量速度的二叉树。

在目标高速运动时, 目标跨过一个距离分辨单元的时间有限, 一个距离单元内的积累次数有限, 此时, 四重频脉冲串信号解速度模糊可以精简为三重频, $T_1 > T_2 > T_3$, 且 $T_1 - T_2 > T_2 - T_3$, 即将四重

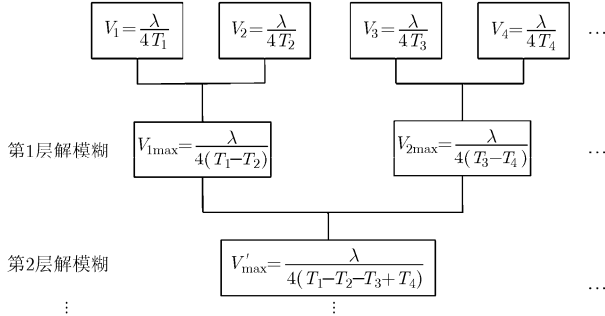


图 2 多层解速度模糊时最大测量速度的二叉树

频脉冲串信号中间两重频合并。前两 CPI 做第 1 层解速度模糊的最大不模糊速度 $V'_{1\max} = \frac{\lambda}{4(T_1 - T_2)}$ ，后两 CPI 做第 1 层解速度模糊的最大不模糊速度 $V'_{2\max} = \frac{\lambda}{4(T_2 - T_3)}$ ，最后做第 2 层解速度模糊，最大不模糊速度为

$$V''_{\max} = \frac{\lambda}{4(T_1 - 2T_2 + T_3)} \quad (6)$$

三重频由于精简了一重频，则需要两次使用中间重频的测速结果。由双重频解速度模糊的量化要求可推得三重频解速度模糊的量化要求为

$$\left. \begin{aligned} N &> \frac{1}{2} \left(\frac{4V_1}{V_2 - V_1} + 1 \right) \\ N &> \frac{1}{2} \left(\frac{4V_2}{V_3 - V_2} + 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

T_2 与 T_1 之间的差越小，不模糊速度越大，但实际上 T_2 与 T_1 的差不能太小，因为由统计波动引起的速度估计的误差也与 T_2 和 T_1 的差成反比^[12]。因此，对于三重频解两层速度模糊参数选取方法，可以建立模型如式(8)，其中 T_{sum} 是不同 CPI 总时长限制， v_{\max} 是希望测量的最大速度， V_m 是对应 T_m 能测量的最大不模糊速度。

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & Z = T_1 - T_3 \\ \text{s.t.} \quad & C1: N \sum_{m=1}^3 T_m \leq T_{\text{sum}} \\ & C2: T_1 > T_2 > T_3 \\ & C3: V''_{\max} = \frac{\lambda}{4(T_1 - 2T_2 + T_3)} \geq v_{\max} \\ & C4: N > \frac{1}{2} \left(\frac{4V_m}{V_{m+1} - V_m} + 1 \right), \quad m = 1, 2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

4 仿真及结果分析

仿真 1 解速度模糊的量化误差

双重频脉冲发射信号参数如下：第 1 种脉冲重

复周期 $T_1 = 200 \mu\text{s}$ ，第 2 种脉冲重复周期 $T_2 = 190 \mu\text{s}$ ，载频 $f_c = 6 \text{ GHz}$ 。第 1 种 CPI 最大不模糊测量速度 $V_1 = 62.5 \text{ m/s}$ ，第 2 种 CPI 最大不模糊测量速度 $V_2 = 65.7 \text{ m/s}$ ，两种 CPI 解模糊后最大测量速度 $V_{\max} = 1250 \text{ m/s}$ 。本文认为，当脉冲个数 $N > \frac{1}{2} \left(\frac{4V_1}{V_2 - V_1} + 1 \right) = 38.5$ 时，将不存在量化误差。选取每个 CPI 的脉冲个数 $N = 30$ ，利用 1 维集算法解速度模糊，得到量化误差造成的测速误差如图 3。

在图 3 中，在测速误差大约为 0 的区域以外，还存在两块不间断的条状区域具有较大的测速误差。根据第 3 节，当 $N < \frac{1}{2} \left(\frac{4V_1}{V_2 - V_1} + 1 \right)$ 时，会在真实速度为 $\left(\frac{V_1}{N}, \frac{V_2}{N} \right)$ 等区间出现较大误差，该误差是由脉冲个数不够造成的模糊数估计误差引起的。为了观察不同 PRT 个数对测速均方根误差的影响，定义解模糊测速均方根误差

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (x_i - v_i)^2}{K}} \quad (9)$$

其中， x_i 是解模糊后的速度值， v_i 是真实速度， x_i 是对关心的可解模糊范围内的速度以一个较小的间隔遍历， K 为选取速度的个数。不同 PRT 个数与 1 维集解速度模糊均方根误差变化关系如图 4 所示。当 $N > 38$ 时，PRT 个数对解速度模糊均方根误差影响不大，即不存在量化误差，验证了前面的推导。

在双重频测速范围 $\left(-\frac{\lambda}{4(T_1 - T_2)}, \frac{\lambda}{4(T_1 - T_2)} \right)$ 内，当 $N > \frac{1}{2} \left(\frac{4V_1}{V_2 - V_1} + 1 \right)$ 时，解速度模糊不会出现二义性。

仿真 2 三重频两层解速度模糊效果

三重频脉冲发射信号参数如下：第 1 种脉冲重复周期 $T_1 = 200 \mu\text{s}$ ，第 2 种脉冲重复周期 $T_2 = 190 \mu\text{s}$ ，第 3 种脉冲重复周期 $T_3 = 181 \mu\text{s}$ ，载频 $f_c = 6 \text{ GHz}$ ，脉冲个数 $N = 60$ 满足三重频解速度模糊量化要求。多层解速度模糊效果如图 5。在选取合适的参数条件下，利用三重频解速度模糊将会获得比双重频更大的不模糊测速范围。以双重频为基础模块进行级联的多层解速度模糊系统，将获得比双重频系统指数级数增长的不模糊测速范围。

5 结束语

针对多重频解速度模糊系统中，信号参数选择不合理导致解速度模糊存在量化误差或解模糊的速

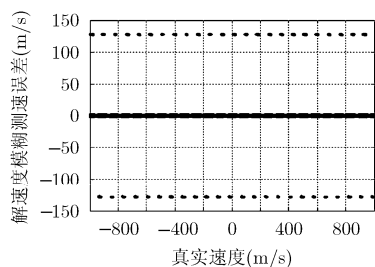


图3 存在量化误差时1维集解速度模糊测速误差图

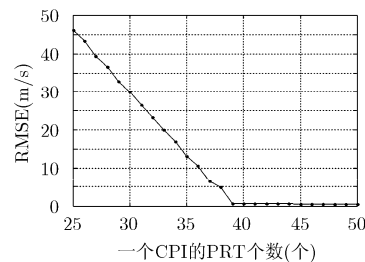
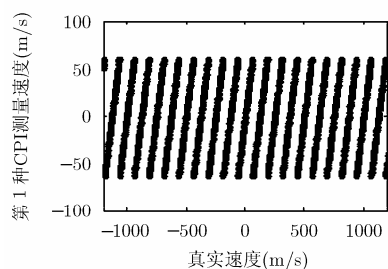
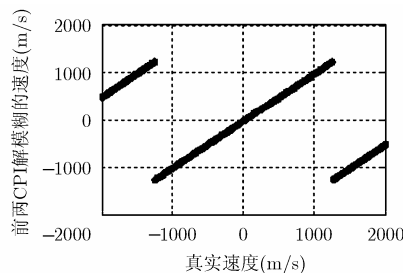


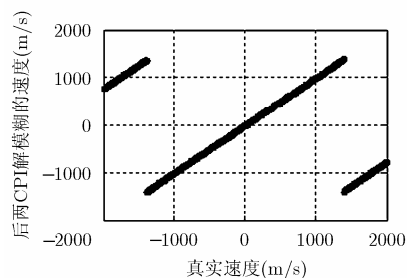
图4 不同PRT个数与1维集解速度模糊均方根误差曲线



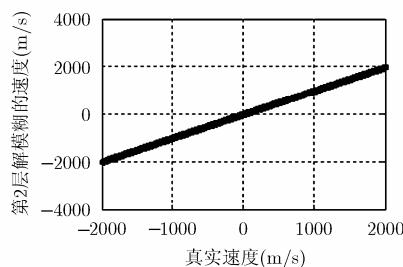
(a)第1种CPI测量与真实速度曲线



(b)前两CPI解模糊效果



(c)后两CPI解模糊效果



(d)两层解模糊效果

图5 多层解速度模糊效果

度范围不够大的问题, 本文通过推导, 计算了脉冲重复数的下界, 使在双重频测速范围内, 当脉冲个数相同或不同时, 解速度模糊时不会出现二义性。提出了一种四重频脉冲串解速度模糊的新方式, 并推导了四重频信号脉冲个数的下界, 简化了四重频脉冲串信号为三重频脉冲串信号。因为本文都是在信噪比足够大的场合下进行计算的, 理论推导时假设不存在速度门测量错误的情况, 而实际测量中, 采用多层多重频脉冲串信号解速度模糊时, 若存在速度门测量误差或有量化误差的情况, 则对最终速度的测量可能存在较大影响。该算法的鲁棒性研究将是下一步研究方向。

参考文献

- [1] DOVIAK R J and ZRNIC D S. Doppler Radar and Weather Observation[M]. New York: Academic, 1993.
- [2] WANG Zhirui, XU Jia, and HUANG Zuzhen. Doppler ambiguity resolver via range blur in range-Doppler domain[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(20): 1719-1721. doi: 10.1049/el.2016.1000.
- [3] HOVANESSIAN S A. Medium PRF performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1982, 18(3): 286-296. doi: 10.1109/TAES.1982.313320.
- [4] CHANG C Y and CURLANDER J C. Application of the multiple PRF technique to resolve Doppler centroid estimation ambiguity for spaceborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 941-949. doi: 10.1109/36.175329.
- [5] 黄振兴, 万征. 距离-速度干扰数据同时分辨的孙子定理算法[J]. *电子学报*, 1992, 20(9): 27-33.
HUANG Zhenxing and WAN Zheng. Simultaneous ambiguity resolution on noisy range and velocity data via CRT algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1992, 20(9): 27-33.
- [6] 秦国栋, 陈伯孝, 陈多芳, 等. 多载频MIMO雷达解速度模糊及综合处理方法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(7): 1696-1700. doi: 10.3724/SP.J.1146.2008.01054.
QIN Guodong, CHEN Baixiao, CHEN Duofang, et al. Velocity ambiguity resolution and synthesis processing in multi-frequency MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(7): 1696-1700. doi:

- 10.3724/SP.J.1146.2008.01054.
- [7] XU Jingwei, LIAO Guisheng, ZHANG Yuhong, *et al.* An adaptive range-angle-Doppler processing approach for FDA-MIMO radar using three-dimensional localization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 309–320. doi: 10.1109/JSTSP.2016.2615269.
- [8] 陈春晖, 张群, 罗迎, 等. 一种步进频率信号认知雷达波形优化设计方法[J]. *航空学报*, 2016, 37(7): 2276–2285. doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0063.
- CHEN Chunhui, ZHANG Qun, LUO Ying, *et al.* A waveform optimization designing method for cognitive radar with stepped-frequency signal[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(7): 2276–2285. doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0063.
- [9] TRUNK G and BROCKETT S. Range and velocity ambiguity resolution[C]. Proceedings of the IEEE National Radar Conference, New York, 1993: 146–149.
- [10] SUN J, TIAN J, and WAND G. Doppler ambiguity resolution for multiple PRF radar using iterative adaptive approach[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(23): 1562–1563. doi: 10.1049/el.2010.1865.
- [11] 洪一. 脉冲多普勒雷达的速度模糊求解[J]. *现代电子*, 1995, 50(1): 19–22.
- HONG Yi. Resolution on velocity for pulse Doppler radar[J]. *Modern Electronics*, 1995, 50(1): 19–22.
- [12] ZRNIC D S and MAHAPATRA P. Two methods of ambiguity resolution in Pulse Doppler weather radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1985, AES-21(4): 470–483. doi: 10.1109/TAES.1985.310635.
- [13] TAHANOUT M, El Hamid Adane Abd, and CHATELET Jacques Parent du. An improved M-PRT technique for spectral analysis of weather radar observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(10): 5572–5582. doi: 10.1109/TGRS.2015.2425549.
- [14] SI Hongwei and LI Zhaohui. An optimization design scheme for multiple PRT and multi-frequency coherent Doppler velometry[C]. 2016 MTS/IEEE OCEANS'16 Conference, Shanghai, 2016: 1–6.
- [15] XIA Mengying, SU Weimin, and GU Hong. The research on Doppler ambiguity for dual pulse repetition frequencies radar[C]. CIE International Conference on Radar, Guangzhou, 2016: 1090–1093.
- 夏梦颖: 女, 1990年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理.
- 苏卫民: 男, 1959年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达成像.
- 顾红: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理、噪声雷达体制、稀疏阵列信号处理.
- 卢建春: 男, 1983年生, 助理工程师, 研究方向为阵列信号处理、信息自动化.