

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Калюжный Анатолий Тимофеевич*

канд. техн. наук, доцент

Новосибирский государственный аграрный университет  
г. Новосибирск, Новосибирская область

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАЙМНОЙ НАВИГАЦИИ ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

*Аннотация:* в статье представлен анализ амплитудных методов определения взаимного положения ведущего и ведомого машинно-тракторных агрегатов в магнитном поле вертикальной рамки. Автором установлены математические зависимости погрешности и чувствительности навигационных устройств местоопределения от координат взаимного положения агрегатов.

*Ключевые слова:* сельскохозяйственная электронавигация, дублерное вождение, магнитное поле рамки, взаимное местоположение.

На этапе перехода от ручного управления сельскохозяйственными машинно-тракторными агрегатами (МТА) к автоматическому практическое применение может найти автоматизированное групповое управления на базе дублерного вождения, когда ведомый трактор-дублер автоматически отслеживает траекторию ведущего трактора-лидера. При этом для определения их взаимного положения могут найти применение индукционные методы электронавигации.

В качестве источника навигационного магнитного поля удобно применять круговую рамку с переменным током [1, 2]. Поле рамки не обладает сферической симметрией, поэтому технические параметры навигационных устройств, формирующих сигналы рассогласований по интервалу и дистанции, существенно зависят от пространственной ориентации рамки.

В [2] описаны методы взаимной навигации агрегатов при горизонтальном расположении рамки; в настоящей работе рассматривается определение взаимного положения МТА при расположении рамки в вертикальной плоскости.

Взаимное положение ведущего и ведомого агрегатов характеризуется взаимным боковым смещением или интервалом  $b$ , дистанцией  $d$  и взаимными углами курса  $\alpha$ , крена  $\gamma$  и галопирования  $\psi$ . Безусловным приоритетом обладает формирование сигнала траекторного рассогласования как разности между требуемым и фактическими значениями интервала.

В навигации для определения места нахождения объекта применяют т.н. «метод засечек», суть которого заключается в определении места объекта как точки пересечения двух линий возможного положения объекта. Этот же метод можно применять для определения взаимного положения МТА индукционными методами, используя в качестве линий возможного положения равносигнальные линии (изолинии) переменного магнитного поля, создаваемого на одном из агрегатов. В этом случае одна из линий возможного положения будет характеризовать интервал, а вторая – дистанцию. Причем точность метода ограничивается кривизной равносигнальных линий, используемых в качестве линий возможного положения и соответствующих измеренным значениям навигационного параметра (модуля или проекции вектора напряженности).

«Взаимное положение» предполагает положение ведущего агрегата относительно ведомого или наоборот – ведомого относительно ведущего. Эти значения совпадают при движении агрегатов параллельными курсами, когда параллельны их продольные оси. Но если агрегаты движутся по криволинейным траекториям, то положения ведущего относительно ведомого и ведомого относительно ведущего будут различными, следствием чего является зависимость траектории дублера от способа определения взаимного положения агрегатов.

В [1, 2] показано, что модуль напряженности магнитного поля в меридиональной плоскости рамки описывается уравнением:

$$H = M \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} / r^3, \quad (1)$$

где  $M$  – магнитный момент рамки,

$\theta$  – зенитный угол точки наблюдения напряженности магнитного поля,

$r$  – расстояние от точки наблюдения поля до центра рамки.

Расположим рамку на тракторе-лидере в вертикальной плоскости таким образом, чтобы аксиальная ось рамки была параллельна продольной оси трактора. Для анализа методов взаимной навигации в центре рамки разместим начало прямоугольной системы координат OXYZ и направим ось OZ вдоль аксиальной оси рамки, а радиальную ось OX – вертикально вверх. Тогда значение интервала  $b$  будет определяться координатой у места нахождения точки измерения напряженности магнитного поля на дублере; значение дистанции  $d$  – координатой z.

*Амплитудные методы взаимной навигации при движении агрегатов  
шеренгой.*

Будем идентифицировать место агрегата точкой расположения на нем рамки или приемника магнитного поля. Тогда «движение шеренгой» означает, что нормально приемник магнитного поля находится в плоскости рамки и дистанция  $d = z = 0$ . При отставании или опережении дублером лидера дистанция принимает ненулевые положительные или отрицательные значения.

Как показано в [1], равносигнальные линии модуля вектора напряженности магнитного поля образуют в меридиональной плоскости ZOY овал, состоящий из двух полуокружностей, концы которых соединены практически прямыми линиями, длина которых составляет 52% радиуса полуокружности. Это позволяет определять интервал  $b$  при движении агрегатов шеренгой по величине модуля вектора напряженности, а ошибку траекторного управления дублера формировать как разность измеренного  $H$  и требуемого  $H_0$  значений модуля вектора напряженности:

$$\delta = \Delta b \equiv H - H_0 \quad (2)$$

В таблице 1 приведены результаты вычисления координат точек РСЛ модуля вектора напряженности, проходящей через точку с координатами ( $z = 0$ ;  $y = 10$  отн. единиц).

Таблица 1

$\Theta$ , град	$r$ , отн.ед	$z$ , о.е.	$y$ , о.е.	$\Delta_y$ , %
0	12,6	12,6	0	100
15	12,49	12,06	3,23	67,67
30	12,17	10,54	6,085	39,15

45	11,65	8,238	8,238	17,62
60	10,98	5,489	9,507	4,93
75	10,31	2,668	9,96	0,414
90	10	0	10	0
105	10,31	-2,6684	9,958608	0,413917
120	10,98	-5,48879	9,506857	4,931427
135	11,65	-8,23774	8,237745	17,62255
150	12,17	-10,5401	6,085327	39,14673
165	12,49	-12,0658	3,233021	67,66979
180	12,6	-12,5992	0	100

Последний столбик в таблице показывает процентное отклонение координаты  $y = b$  от номинального значения 10 отн. единиц.

Данные таблицы 1 показывают, что при формировании траекторного рассогласования согласно (2) изменение дистанции  $d$  в диапазоне  $|z| < 0,27b$  будет сопровождаться изменением интервала  $b$  не более чем на  $\pm 0,21\%$ . Так, если интервал  $b = 10\text{м}$ , то изменение дистанции на  $\pm 2,7$  м изменит интервал не более чем на  $\pm 2,1$  см.

Динамическая чувствительность навигационных устройств пропорциональна производной от напряженности по измеряемой координате в точке наблюдения поля. Для её определения перепишем уравнение (1):

$$H = \frac{M}{r^4} \sqrt{r^2 + 3z^2} = \frac{M}{(z^2 + y^2)^2} \sqrt{y^2 + 4z^2}. \quad (3)$$

Продифференцировав (3) по  $y$ , получим:

$$K_y = \frac{dI}{dy} = -3I \cdot y \frac{5z^2 + y^2}{(z^2 + y^2)^3 \sqrt{4z^2 + y^2}} \approx \frac{-3M}{y^4}.$$

Следовательно, при изменении интервала  $b = y$  в два раза допустимый диапазон изменения дистанции также возрастет в два раза, но одновременно чувствительность снизится, и зона нечувствительности системы траекторного управления возрастет в  $2^4 = 16$  раз. Поэтому для восстановления прежней ширины зоны нечувствительности потребуется увеличить в 16 раз коэффициент передачи датчика напряженности или магнитный момент рамки  $M$ .

Поскольку в диапазоне  $75 \leq \theta \leq 105^\circ$  равносигнальные линии напряженности параллельные, и взаимное перемещение агрегатов осуществляется вдоль равносигнальных линий, то в указанном диапазоне чувствительность навигационного устройства измерения интервала практически не зависит от координаты  $z$ .

Метод можно также реализовать, повернув рамку вокруг вертикальной оси ОХ на угол  $90^\circ$  и поменяв местами оси ОZ и ОY. Это увеличит напряженность магнитного поля в точке измерения в два раза и позволит при прочих равных условиях увеличить интервал в 1,26 раз. Однако при этом возрастет зависимость интервала от дистанции, так как ведомый агрегат будет перемещаться относительно ведущего не по прямой, а по дуге окружности, радиус которой составит  $b/1,26 = 0,8b$ . Так, если  $b = 10\text{м}$ , то погрешность измерения интервала  $\pm 2,1\text{ см}$  будет достигнута уже при изменении дистанции в диапазоне  $\pm 0,9\text{ м}$ . Кроме того, возрастет влияние крена рамки, так как отклонение зенитного угла  $\theta$  от нулевого значения уменьшает напряженность магнитного поля согласно (1).

Достоинством измерения интервала по величине модуля напряженности является низкая чувствительность к изменению магнитного момента рамки; так, при  $b=10\text{ м}$  изменение магнитного момента  $M$  рамки на 1% изменит боковое смещение  $b$  на 3,3 см. Метод обеспечивает также незначительную чувствительность навигационных устройств к изменению углов крена и галопирования как лидера, так и дублера.

Если напряженность измеряется впереди плоскости рамки, то изменение направления движения лидера изменит направление движения дублера в ту же сторону. Но если датчик напряженность отстает от рамки, то первоначально направление поворота дублера будет противоположным.

Рамку можно размещать на дублере, а напряженность измерять на лидере. При этом качество траекторного регулирования изменится – при положении рамки впереди датчика напряженности взаимное положение агрегатов может оказаться неустойчивым, так как поворот дублера, например, в сторону лидера

будет сопровождаться уменьшением измеряемой напряженности, в результате чего система траекторного управления сформирует сигнал на дальнейший поворот дублера в ту же сторону.

При движении агрегатов шеренгой измерять дистанцию  $d$  можно по величине проекции вектора напряженности на поперечную ось дублера. При этом измеряемое значение проекции вектора напряженности:

$$H_d = H \sin(\theta + \arctg(0,5 \operatorname{tg} \theta)).$$

Это выражение можно переписать:

$$H_d = \frac{M}{\sqrt{(z^2 + y^2)^3}} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} \cdot (\sin \theta \cdot \cos(\arctg(0,5 \operatorname{tg} \theta)) + \cos \theta \cdot \sin(\arctg(0,5 \operatorname{tg} \theta))). \quad (4)$$

Учитывая, что:  $\cos \theta = \frac{z}{\sqrt{z^2 + y^2}}$ ;

$$\arctg(0,5 \operatorname{tg} \theta) = \arctg\left(\frac{y}{2z}\right) = \arccos \frac{2z}{\sqrt{4z^2 + y^2}} = \arcsin \frac{y}{\sqrt{4z^2 + y^2}},$$

выражение (4) после преобразований принимает вид:

$$H_d = 3M \frac{zy}{(z^2 + y^2)^{5/2}}.$$

Статическая чувствительность навигационных устройств измерения дистанции (без коррекции) определяется как отношение измеренного сигнала к величине отклонения дистанции от нулевого значения:

$$K_\delta = H_d/z = 3M \frac{y}{(z^2 + y^2)^{5/2}}.$$

Динамическая чувствительность навигационных устройств измерения дистанции  $K_d$  в заданной точке равна производной от напряженности по измеряемой координате:

$$K_d = \frac{dH_d}{dz} = 3My \frac{y^2 - 4z^2}{(z^2 + y^2)^{7/2}}.$$

Зависимость  $H_d$  (сигнала рассогласования дистанции), статической чувствительности  $K_\delta$  и динамической чувствительности  $K_d$  устройств измерения дистанции от относительного значения дистанции  $z/y$  показана на рис. 1.

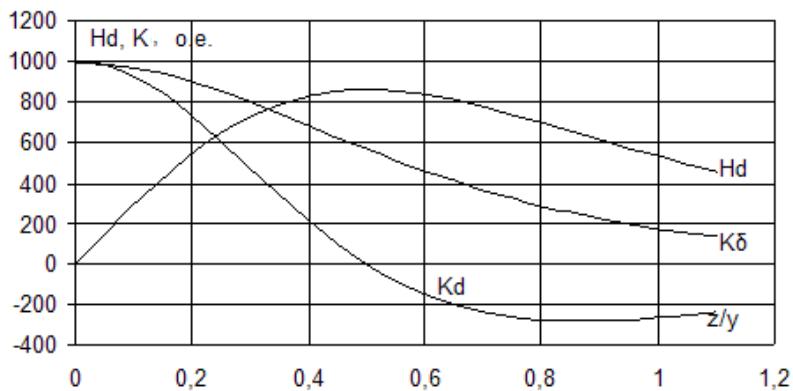


Рис.1. Зависимость сигнала рассогласования дистанции  $H_d$ , статической  $K_\delta$  и динамической  $K_d$  чувствительности от величины дистанции  $z/y$

#### *Амплитудные методы взаимной навигации МТА при движении колонной.*

При движении агрегатов колонной амплитудный метод определения траекторного рассогласования возможен по величине проекции вектора напряженности на направление, образующее с осью OZ рамки угол  $\zeta = 90^\circ - (\theta + \arctg(0,5\operatorname{tg}\theta))$ , а с поперечной осью дублера – угол  $\chi = \arctg(0,5\operatorname{tg}\theta)$ . Целесообразно выбирать значение угла  $\theta$  равным нулю – тогда осью проекции является поперечную ось дублера. В этом случае дублер ориентируется относительно лидера вдоль магнитных силовых линий рамки, а измеренное значение проекции вектора напряженности на ось OY описывается уравнением (5). Но так как теперь измеряемой является координата  $y$ , то статическая чувствительность устройства формирования сигнала траекторного рассогласования:

$$K_\delta = H_y/y = 3M \frac{z}{(z^2 + y^2)^{5/2}},$$

а динамическая:

$$K_y = \frac{dH_\delta}{dy} = 3Mz \frac{z^2 - 4y^2}{(z^2 + y^2)^{7/2}}.$$

Зависимость сигнала траекторного рассогласования  $H_y$ , статической и динамической чувствительности формирователей траекторного рассогласования показана на рис. 2.

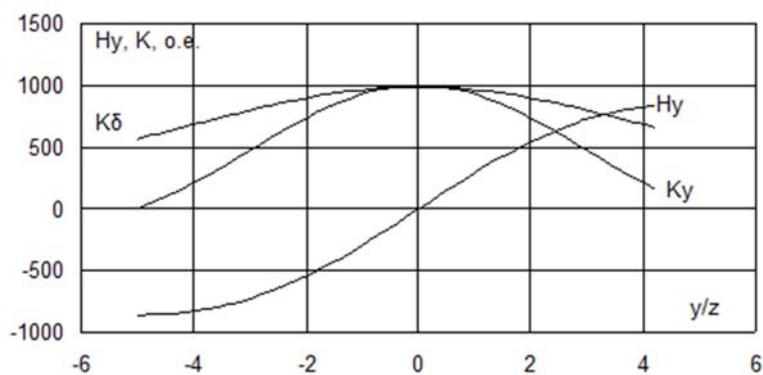


Рис. 2. Основные параметры формирователя траекторного рассогласования при движении МТА колонной

Интервал и дистанция представляют собой прямоугольные координаты места нахождения дублера. Представляет интерес выяснить особенности этой измерительной системы координат BOD.

При движении агрегатов шеренгой вращение дублера вокруг вертикальной оси, совмещенной с приемником магнитного поля, на величину сигнала траекторного рассогласования не влияет. Следовательно, система координат BOD связана с рамкой и совпадает с системой YOZ, поворот которой вокруг вертикальной оси OX изменит измеряемые значения интервала и дистанции.

Иная картина наблюдается при движении агрегатов колонной, когда измеряемое значение ошибки траекторного управления (интервала) зависит от направления продольных осей обоих агрегатов – ведомого и ведущего.

Можно принять, что в последнем случае начало системы координат BOD совмещено с приемником магнитного поля, а ось ОВ направлена параллельно поперечной оси дублера. При этом нулевому значению рассогласования будет соответствовать направление продольной оси дублера не на рамку, а на некоторый виртуальный ориентир, лежащий на оси OZ рамки, на расстоянии  $L = OM$  от неё, рис. 3.

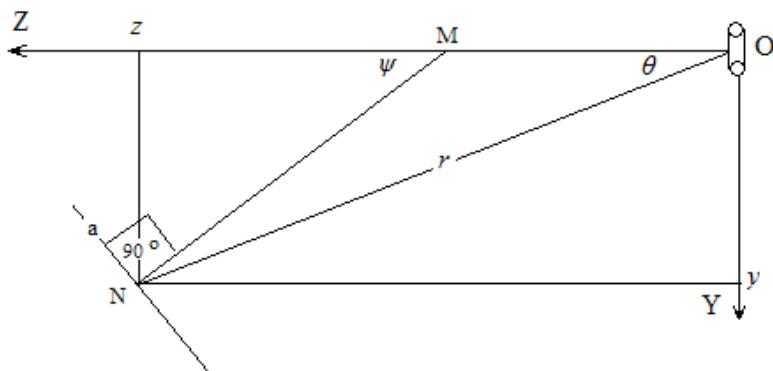


Рис. 3. Смещение виртуального ориентира М вдоль оси ОZ при отклонении дублера N от оси ОZ рамки на расстояние y

На рис. 3 отрезок «а» – ось проекций вектора напряженности, параллельная поперечной оси дублера N. В точке N вектор напряженности совпадает с направлением MN. Угол  $\psi = \theta + \arctg(0,5\tg\theta)$ , угол MNO =  $\arctg(0,5\tg\theta)$ . Поэтому:

$$OM = \frac{r \sin(\arctg(0,5\tg\theta))}{\sin(\theta + \arctg(0,5\tg\theta))} = \frac{r \cdot \tg\theta}{\sqrt{4 + \tg^2\theta \cdot (\sin\theta \cdot \cos(\arctg(0,5\tg\theta)) + \cos\theta \cdot \sin(\arctg(0,5\tg\theta)))}} = \frac{r}{3 \cos\theta} = \frac{z^2 + y^2}{3z}.$$

Таким образом, даже при малых отклонениях дублера от продольной оси рамки ориентиром является не рамка, а точка на оси OZ рамки, смещенная в сторону дублера на расстояние, равное 1/3 фактического значения дистанции между агрегатами. По мере увеличения зенитного угла  $\theta$  это расстояние возрастает, и при  $\theta = 54,75^\circ$  лидер и дублер расположатся взаимно перпендикулярно. При дальнейшем увеличении зенитного угла отрезок OM продолжает возрастать и при  $\theta = 90^\circ$  достигает бесконечности – мгновенный поворот лидера на  $90^\circ$  по часовой стрелке способен изменить направление продольной оси дублера на такой же угол против часовой стрелки, так что тракторы окажутся развернутыми в противоположные стороны.

При движении агрегатов вдоль горизонталей склонов происходит сползание вниз по склону как агрегатируемой машины ведущего агрегата с рамкой, так и трактора-дублера с датчиком магнитного поля. Поэтому движение вдоль горизонталей возможно только при направлении продольных осей агрегатов вверх по

склону на величину угла скольжения, в результате чего между продольными осями и векторами скорости рамки и датчика образуются ненулевые углы взаимного бокового скольжения. Появится погрешность траекторного управления, обусловленная несовпадением динамических и статических продольных осей рамки и датчика. При одинаковых углах  $\alpha$  скольжения рамки и датчика величина погрешности  $\Delta = ds \sin \alpha$ ; при отсутствии скольжения датчика погрешность  $\Delta = ds \sin \alpha / 3$ , а при скольжении датчика в противоположную рамке сторону на угол  $\alpha/3$  погрешность отсутствует. Так, при одинаковых углах скольжения, например,  $\alpha = 1^\circ$  и дистанции  $d = 6$  м, погрешность составит 0,1 м.

Боковое скольжение тракторов наблюдается при движении не только на склонах, но и по горизонтальной поверхности, что является следствие неидентичности движителей трактора по бортам, асимметричностью приложения тягового сопротивления агрегатируемых машин/орудий, состоянием почвы и др. Что следует иметь в виду при автоматизации траекторного управления МТА не только при дублерном вождении.

### ***Список литературы***

1. Калюжный А.Т. Теория сельскохозяйственной навигации: магнитное поле круговой рамки. // Новое слово в науке: перспективы развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. (Чебоксары, 10.09.2014 г.) редкол.: О.Н.Широков [и др.].- Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2014 – 364. С. 207-211.
2. Калюжный А.Т. Анализ индукционных методов взаимной навигации тракторных агрегатов [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. – 2014 – № 1(11) – С.84-97. – режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/896/622>